

이학석사 학위논문

도시생활폐기물 소각시설의 운전요소와 대기오염물질 배출특성의 관계해석

지도교수 옥 곤

이 논문을 대학원 학위논문으로 제출함



2005년 2월

부경대학교 산업대학원

지구환경과학과

김 현 석

김현석의 이학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월 18일

주 심 이학박사 김 영 섭



위 원 공학박사 정 용 현



위 원 공학박사 옥 곤



목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	1
I. 서론	3
II. 폐기물 처리현황 및 대기오염물질의 특성	5
1. 폐기물처리 및 소각시설 현황	5
1.1. 국내의 폐기물처리 동향	5
1.2 국내의 소각시설 현황	8
2. 대기오염물질의 특성	10
2.1 대기오염물질의 생성과정 및 영향	10
III. 연구대상소각시설의 공정현황	19
1. 소각시설의 개요	19
2. 소각시설의 주요공정별 특성	21
3. 조사기간	24
4. 시료채취 및 분석방법	26
4.1 굴뚝에서의 대기오염물질 측정	26
4.2 폐기물의 시료채취 및 성분분석	27
4.3 소각시설의 운전자료 조사	27

IV. 결과 및 고찰	28
1. 대기오염물질 배출농도 및 운전요소와의 관계해석	28
1.1 폐기물의 성상 및 물리적 특성 비교	28
1.2 대기오염물질의 농도수준	38
1.3 소각시설 운전요소와의 상관성 해석	48
2. 소각시설에서의 대기오염물질 배출량 산정	59
2.1 배출가스의 농도 분포	59
2.2 대기오염물질 배출량 산정	62
V. 결론	69
참고 문헌	72
감사의 글	77

List of Tables

Table 1. The MSW composition according to treatment method	6
Table 2. General waste treatment & Disposal facilities	9
Table 3. Process Item of principal incineration plant	19
Table 4. Types of Stoker on Incinerator	21
Table 5. Sampling periods and each level for air samples	25
Table 6. The Composition of TMS facilities	26
Table 7. The Characteristics of Waste	32
Table 8. Correlation matrix among 17 variables	49
Table 9. The characteristics of output gas from Stack in incineration facilities	59
Table 10. Emission Factor of each sewerage treatment plant	63
Table 11. Amount of air pollutants disposal by each pachway	66
Table 12. The results of emission loads for air pollutants & Dioxin loads from 1999 to 2003	68

List of Figures

Fig. 1. A change of MSW management in Korea	7
Fig. 2. Variation of the number of domestic Incineration facilities	9
Fig. 3. Molecular structures and numbering systems of PCDDs and PCDFs	17
Fig. 4 Molecular structures and numbering systems of PCBs	18
Fig. 5. Outline of MSWI plant	20
Fig. 6. Variation of low heating value from 1999 to 2003	29
Fig. 7. Seasonal variation of low heating value from 1999 to 2003	30
Fig. 8. Variation of physical composition on solid waste from 1999 to 2003	35
Fig. 9. Variation of chemical composition(Moisture, Ash, combustibles) on solid waste from 1999 to 2003	36
Fig. 10. Variation of low heating value and output on incinerator	37
Fig. 11. Variations of CO levels from 1999 to 2003	39
Fig. 12. Variations of NO _x levels from 1999 to 2003	40
Fig. 13. Variations of Dust levels from 1999 to 2003	42
Fig. 14. Variations of SO _x levels from 1999 to 2003	43
Fig. 15. Variations of HCl levels from 1999 to 2003	44

Fig. 16. Isomer profiles of Dioxin levels from 1999 to 2003	47
Fig. 17. The correlation with incineration value and low heating value	50
Fig. 18. The correlation with characteristics of waste and low heating value	52
Fig. 19. The correlation with foods and low heating value	53
Fig. 20. Trend of 1st · 2nd air flow and output of ECO O ₂ & CO concentration	55
Fig. 21. Variation of Dioxin concentration according to addition of PAC	56
Fig. 22. Variation of HCl, SO _x concentration according to changing of pH ·	57
Fig. 23. Trend of yearly Emission Factor of air pollutants	64
Fig. 24. Trend of yearly Emission Factor of Dioxin	65
Fig. 25. Variation of air pollutants loads	68

Evaluation of Relationships Emission Characteristics of Air Pollutants and Operating Parameter for Municipal Solid Waste Incineration facility

Hyun-Seok Kim

*Department of Earth Environmental Sciences,
Graduate School of Industry, Pukyong National University
Busan 608-737, Korea*

Abstract

This study was conducted to explain air pollutants loads and the emissive characteristics of air pollutants from Municipal Solids Waste Incineration facility. The Environmental data were collected from 1999 to 2003 and analyzed. These data were compared of operating parameters and estimated yearly emission factor and emission

concentration each air pollutants.

The yearly low heating value from 1999 to 2003 were 1,463, 1,503, 1,483, 1,796, 2,275 kcal/kg, so the yearly amount of incineration decreased 208, 199, 200, 189, 175 ton/day respectively. The ranges of CO, NO_x, Dust, SO_x, HCl, Dioxin concentration were 0.5~9.7ppm, 13~43ppm, 4~11mg/Sm³, 0.1~7.8ppm, 0.2~2.0ppm, 0.000~0.083ng-TEQ/Nm³ for five years, respectively.

From statistics analysis, the factors those were showed a strong relationships were Moisture, Combustibles, Foods, Papers, Dust, CO, First Air flow. According to input of PAC(Particle Active Carbon), it was optimal for supply of 150mg/Nm³ to remove dioxin effectively. The optimal pH condition of 1st, 2nd wet scrubber were 4.5~5.0, 7.5~8.0 for removing HCl and SO_x.

The average Emission Factors of the air pollutants discharging from the stack were CO 0.030kg/ton, NO_x 0.572kg/ton, Dust 0.062kg/ton, SO_x 0.073kg/ton, HCl 0.014kg/ton, Dioxin 0.329μg-TEQ/ton. The ranges of yearly air pollutants loads were CO 894~4,067kg/yr, Dust 2,475~4,787kg/yr, NO_x 28,341~37,473kg/yr, SO_x 2,084~6,224kg/yr, HCl 541~1,414kg/yr, Dioxin 3~42mg-TEQ/yr.

Therefore, this research showed that it could be find out the best operating condition for relationships the emissive characteristics of air pollutants and operating parameters.

Keywords : Incineration facility, Emission Factor, Air Pollutants, Operating Parameter

I. 서론

급속한 경제성장은 생활수준 향상 및 인구의 도시집중으로 도시생활 폐기물을 지속적으로 증가시켜 왔고, 이로 인해 폐기물처리가 심각한 사회문제로 대두되어 왔다. 도시생활폐기물 처리방법으로 과거에는 매립이 많은 부분을 차지하였으나, 매립지의 부족 및 확보가 어려워지고 더불어 소각기술이 도입됨에 따라 1994년 이후부터는 재활용과 함께 소각이 증가되고 있다. 폐기물 정책방향을 제시한 『제2차 폐기물관리종합계획』에 따르면 국토의 효율적인 활용과 매립지 수명연장을 위해 폐기물 처리방법중 소각처리의 비율을 2002년 12%에서 2011년에는 30%까지 증가시키기 위해 10년간 약 1조 1,000억원을 소각시설 확충에 투자할 계획으로 현재 추진 중에 있다(환경부, 2002).

2002년 12월말 현재 국내에서 발생하는 생활폐기물은 일일 49,902톤으로 이중 약 14.5%인 7,229톤이 소각되어 연간 1,726,976Gcal의 열을 생산한 것으로 조사되었다(환경부, 2003). 이는 각종 폐기물 처리방법에 있어 매립이나 해양투기보다는 소각이 에너지 회수측면에서 효율적인 처리방법임을 보여주고 있다(Werther *et al.*, 1995). 그러나, 소각에 의한 처리는 폐기물의 부피를 감소시키고 소각과정에서 생성되는 에너지를 회수하여 이용할 수 있는 장점은 있으나, 유해한 대기오염물질을 발생시키는 단점도 지니고 있다. 특히, 이들 오염물질은 시설의 부적합한 설계나 운전의 오류발생 시 소각시설 자체에 영향을 주며 대기 중으로 배출 할 경우 환경매체를 통해 대기오염을 유발시키는 것으로 보고되고 있다(Wey *et al.*, 2001).

오염물질이 축적되는 환경매체로는 공기(Czuczwa *et al.*, 1986; Eitzer *et al.*, 1986; Ok *et al.*, 1999), 물 또는 퇴적물(Czuczwa *et al.*,

1984; Smith *et al.*, 1983, Ok *et al.*, 2000), 토양(Nielsen *et al.*, 1987, Ok *et al.*, 2000) 등이 있으며, 이 환경매체를 통해 축적된 오염물질은 먹이사슬에 의해 인간에게 최종적으로 축적되어 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Ryan, 1986).

Oile 등 (1977)에 의해 도시쓰레기 소각시설에서의 비산재(fly ash)중 인체에 유해한 다이옥신류가 함유되어 있다고 발표된 이래 소각시설의 다이옥신 문제가 전 세계적으로 관심을 끌게 되었으며, 미국에서는 『도시폐기물 소각로에서 생성되는 대기오염물질 방지 및 제어에 관한 우수연소방안』이라는 연구보고를 통해 도시생활폐기물 소각시설의 관리지침을 제시한 바 있다(EPA, 1989). 또한, 독일의 Wilken 등 (1992)은 소각대상 폐기물 중의 물리적 구성에 따라 다이옥신류 등 대기오염물질이 다르게 함유된 것으로 보고하였다.

그 밖의 소각시설에서의 다이옥신류 생성 및 방지에 관한 연구를 필두로 대기오염물질 발생 및 저감에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으며(Hanai *et al.*, 1986, 1988; OK *et al.*, 1992), 이러한 연구들은 소각시설에서의 다이옥신 및 각종 대기오염물질을 저감하기 위한 방편으로 기술적인 해결방안 등이 제시되어 왔다. 그러나 소각시설에서 발생하는 각종 대기오염물질이 환경오염과 연계되어 문제시되어 왔지만, 소각시설에서의 운전조건 변동에 따른 대기오염물질의 거동특성을 장기간에 걸쳐 규명하기 위한 검토는 이루어지지 못한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 대상소각시설의 장기간의 실측 자료를 토대로 대기오염물질 배출특성을 파악하고 이를 소각시설의 운전요소 및 폐기물 성상 등과의 상관성을 비교·분석하였으며, 다년간 실측자료를 통하여 배출량을 산정함으로써 효율적이고 안정적인 소각시설 운전 및 오염물질 배출 저감을 위한 기초자료로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

II. 폐기물 처리현황 및 대기오염물질의 특성

1. 폐기물 처리 및 소각시설현황

1.1 국내의 폐기물처리 동향

국내에서 발생하는 생활폐기물의 처리방법은 크게 세 가지로 매립, 소각, 재활용으로 구분된다. 환경부에서 발표한 『전국폐기물 발생 및 처리현황』에 의하면 매립에 의한 처리는 2000년 이전까지 50% 이상의 처리비율을 보이다가 2002년말 현재 41.5%까지 감소되는 것으로 나타났다.

소각에 의한 처리는 1999년 10.3%에서 2002년에는 상승세가 다소 미흡한 14.5%의 비율을 보였는데, 소각처리율의 상승이 다소 미흡한 원인으로서는 소각시 발생하는 대기오염물질에 대한 주민들의 우려와 혐오시설이라는 인식이 인근 주민들의 Nimby 현상을 초래하였고, 지자체 실시 이후 행정구역 경계 입지시 지자체간 갈등 증대가 주요 원인으로 지적되고 있다. 반면, 재활용 처리는 1999년 이전부터 큰 폭으로 상승하여 1999년 38.2%에서 2002년 44.0%로 꾸준한 증가추세를 나타내고 있다. 이는 쓰레기종량제 실시, 1회용품 사용억제, 상품의 과대포장억제 및 음식물 줄이기 정책 등에 의한 결과인 것으로 파악되고 있다(환경부, 2003).

특히, 2002년을 기점으로 처리방법은 재활용(44.0%) 처리가 매립(41.5%) 처리 비율을 앞서 쓰레기 감량화가 지속적으로 이루어지고 있는 것에 반해 소각처리 의존도는 선진국 소각율인 일본 78%, 프랑스 40%에 비하면 아직도 지나치게 낮은 실정이다. 더구나, 국내에 사용중인 232개 매립지의 사용 잔여기간은 약 7.5년 정도(수도권매립지 제외)로 대도시를 제외한 대부분 지역이 매립처리를 하고 있는 실정으로 협소한 국토

여건, 환경오염을 우려한 지역주민들의 반대로 추가 매립지 확보가 점점 어려워지고 있으며(환경부, 2003), 이는 폐기물 소각처리가 2011년까지 30%의 소각처리율 목표계획보다 일부 늘어날 수 있음을 추정할 수 있으며 향후, 폐기물 처리의 방법에 일부 변화가 있으리라 예상된다.

Table 1에서는 폐기물처리방법별로 국내의 생활폐기물 연간처리량을 나타내었고, Fig. 1은 연도별로 폐기물처리방법의 변화추이를 보여주고 있다.

Table 1. The MSW composition according to treatment method(unit: 1,000ton/day)

Years	Total	Landfill	Incineration	Recycling
1993	62.9(100%)	54.2(86.2%)	1.5(2.4%)	7.2(11.4%)
1994	58.1(100%)	47.2(81.2%)	2.0(3.4%)	8.9(15.4%)
1995	47.8(100%)	34.6(72.4%)	1.9(4.0%)	11.3(23.6%)
1996	49.9(100%)	34.1(68.3%)	2.7(5.4%)	13.1(26.3%)
1997	47.9(100%)	30.6(63.9%)	3.4(7.1%)	13.9(29.0%)
1998	44.6(100%)	25.1(56.3%)	3.9(8.7%)	15.6(35.0%)
1999	45.6(100%)	23.5(51.5%)	4.7(10.3%)	17.4(38.2%)
2000	46.4(100%)	21.8(47.0%)	5.4(11.6%)	19.2(41.4%)
2001	48.5(100%)	21.0(43.3%)	6.6(13.6%)	20.9(43.1%)
2002	49.9(100%)	20.7(41.5%)	7.2(14.5%)	22.0(44.0%)

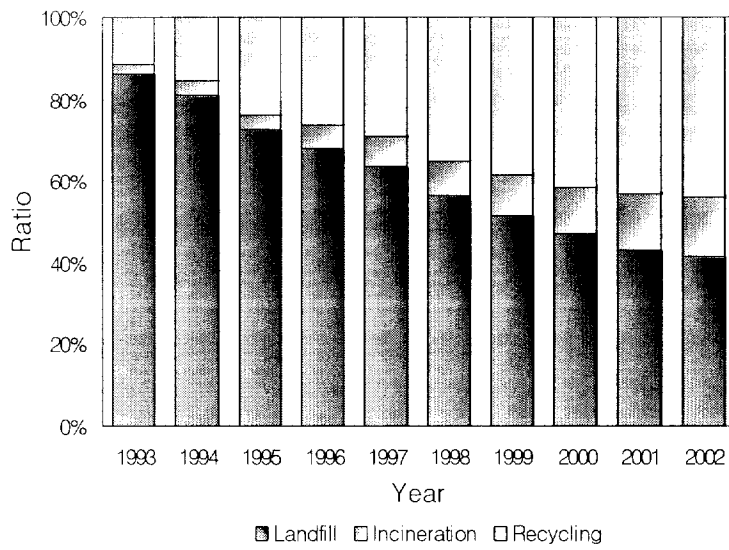


Fig. 1. A change of MSW management in Korea.

1.2 국내의 소각시설 현황

2002년말 현재 우리나라의 생활폐기물 및 사업장폐기물 소각시설은 전국적으로 약 5,609개의 소각시설이 운영되고 있으며, 일일 27,356톤의 시설용량을 가지고 있다. 신규설치는 1995년부터 1997년까지 매년 2,013~3,362개씩 증가하였으나, 1997년 3월 소형 소각시설 억제지침 시행 및 1999년 8월 소형소각로(처리능력 시간당 25kg 미만)의 신규설치 금지와 배출허용기준 강화로 인해 지속적으로 급감한 것으로 나타났다.

운영주체별로 보면, 지방자치단체에서 운영중인 소각시설은 1997년 1,002개소에서 2002년말 현재 489개소로 2배 이상 감소되었고 자가처리업체에서 운영하는 소각시설은 14,857개소에서 5,065개소로 약 3배 정도로 급격하게 감소되었으며, 중간처리업체에서 운영하는 소각시설은 59개소에서 55개소로 낮은 비율로 감소하였다. 시설용량으로는 지방자치단체 일일 10,771톤, 자가처리업체가 12,449톤, 중간처리업체가 4,196톤으로 소각시설수의 감소에도 불구하고 처리용량은 대체적으로 증가하는 것으로 나타났다(환경부, 2003). 이는 소각시설의 용량이 대형화되면서 각종 방지시설의 적정 가동을 통해 오염물질이 배출되고 있음을 알 수 있다.

한편, 국내에서 정상가동중인 일일 50톤 이상의 생활폐기물 대형소각장은 2002년 12월말 29개 사업장으로 시설용량은 일일 5,635톤이며, 총소각량은 2,2243,581톤/년, 평균 가동율은 81%로 대체적으로 낮은 편이지만, 본 연구대상소각시설의 평균 가동율은 전국 평균치보다 훨씬 높은 90%의 가동율을 나타내고 있다(환경부, 2003).

전국 폐기물소각시설 운영현황 및 일간처리량을 Table 2에 나타내었고, Fig. 2에서는 연도별 폐기물소각시설수의 변화추이를 나타내었다.

Table 2. General waste treatment & Disposal facilities.

Incineration Plants		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Local Governments	Number	15	25	514	878	1,002	946	605	605	513	489
	Capacity (ton/day)	766	331	1,008	1,594	11,732	7,824	8,599	8,599	10,778	10,711
Self-Treatment Companies	Number	83	116	3,188	10,601	14,857	14,445	9,395	9,395	7,012	5,065
	Capacity (ton/day)	4,301	767	3,156	6,623	24,237	24,792	15,239	15,239	16,094	12,449
Treatment Companies	Number	2	48	77	82	59	52	55	55	41	55
	Capacity (ton/day)	30	578	1,161	2,442	2,943	5,023	3,228	3,228	3,513	4,196

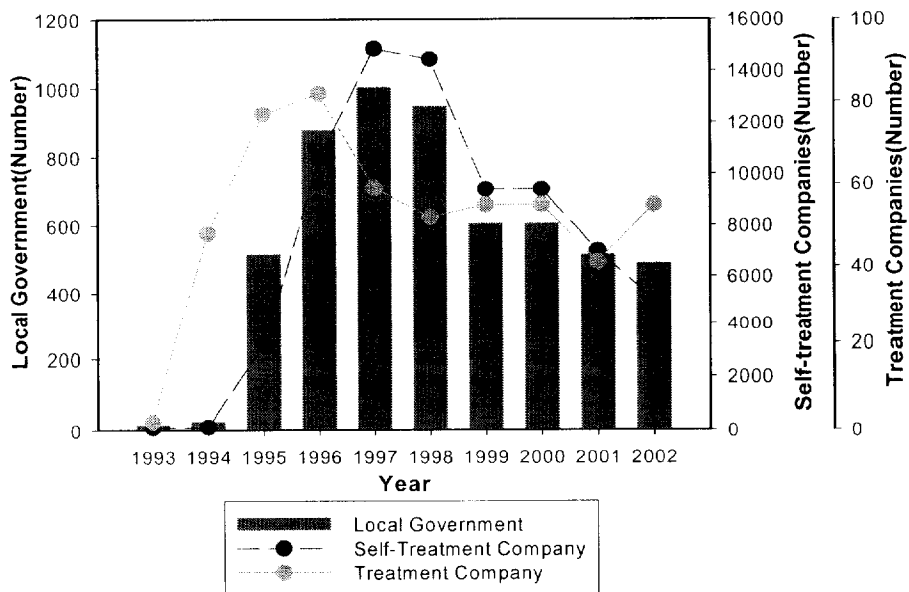


Fig. 2. Variation of the number of domestic Incineration facilities.

2. 대기오염물질의 특성

2.1 대기오염물질의 생성과정 및 영향

인위적으로 생성되는 대기오염물질은 크게 1차 오염물질과 2차 오염물질로 구분하는데 1차 오염물질은 각종 발생원으로부터 대기중에 배출되는 가스나 분진·미립자를 말하며, 2차 오염물질은 대기중에 배출되는 오염물질과 대기 중의 성분이 상호 반응, 태양에너지에 의해 광화학반응을 일으켜 오염물질이 변질되는 것을 말한다.

쓰레기를 소각 처리하는 과정에서 발생하는 오염물질은 1차 오염물질로서 고온의 배출가스에 함유되어 있는데 그 중에는 CO, Dust, NOx, SOx, HCl, Dioxin 등의 유해가스 성분을 포함하고 있다. 이들 대기오염물질의 주요 생성과정 및 영향은 다음과 같다.

(1) 일산화탄소(Carbon monoxide, CO)

CO는 무색, 무미, 무취의 기체로 무연탄과 각종 유류 등 연료의 불완전연소에 기인하여 주로 생성되며, 연료 연소과정에서 연료비에 따라 그 배출농도가 영향을 받는다. 탄화수소계 연료의 불완전연소로 중간 연소단계 동안에 생성되는 화합물 중의 하나인 CO는 분자량이 28.01, 비중은 0.967로서 공기보다 약간 가볍다. CO의 생성기구는 다음과 같이 도식적으로 요약될 수 있는데, 그 일련의 반응은 매우 빠르게 진행된다.



여기서, CO의 생성은 식(2)처럼 RCO의 열분해에 의해서 생성되기도 하고, 식(3)처럼 R기가 다른 물질과 화합하여 생성되기도 한다.



CO의 영향으로는 공기중의 CO농도가 100ppm 이상이 되면, 운동신경과 근육마비가 먼저 일어나고, 두통, 현기증, 구토, 식욕감퇴 및 위 점막의 침식으로 출혈과 부종을 수반하며, 공기 중에 2,000ppm을 초과하면 단시간 내에 사망한다. 일본에서는 소화 39년에 석유, 목탄 스토브로 실험을 하던 중 실험자가 중독으로 졸도한 적이 있다고 보고되었다(古澤 普, 1986).

CO는 호흡기관에 흡입되면 혈액 중 Hemoglobin(Hb)과 결합하여 CO-Hb를 형성하는데, 혈액중의 Hb과의 결합력이 질소보다 200배 이상 강하여 이를 흡입할 경우 Hb의 산소 운반능력이 현저히 감소되어 CO 중독을 일으켜 두통이나 구토증상을 일으키고 심하면 사망에 이를 수 있다 또한, CO는 O₂에 비하여 Hb와 결합하는 능력이 약 210배 강하므로 CO의 농도가 낮은 경우에는 CO-Hb의 농도는 높게 된다는 보고가 있다 (김인달 등, 1969).

담배를 피워도 체내에 CO Hb가 생성되는데 하루에 10~20개비를 피우는 사람은 인체의 4.9%, 30~40개비를 피우는 사람은 9.3%의 CO-Hb가 생성된다고 한다. 따라서, CO는 각종 산업의 발달과 차량의 증가로 인해 대도시 대기오염을 한층 가중시키는 요인이 되고 있는 실정이다 (김윤신, 1994).

(2) 질소산화물(Nitrogen Oxides, NO_x)

NO_x는 고온의 연소가스영역에서 연료와 공기의 분포가 불균일한 상태에서 질소(N)와 산소(O)사이의 반응에서 생성된다. 화학반응에 따라 Thermal NO_x, Prompt NO_x, Fuel NO_x로 분류되며, 그 생성기구도 달라진다. 소각시설에서는 Thermal NO_x가 대부분을 차지하지만, 유기질소 화합물을 다량으로 함유하고 있는 폐기물을 소각시킬 때는 Fuel NO_x가 중요한 NO_x의 생성원이 되기도 한다(이봉훈, 1993).

NO_x는 여러가지 질소산화물(NO, NO₂, N₂O, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅)을 총칭하여 표시하는데, 대기오염에 중요한 영향을 미치는 것은 NO와 NO₂로서 전체의 95%를 차지하는 것이 NO이다. 연소장치에서 NO 생성에 대한 메카니즘은 많이 제안되었으나, 가장 널리 적용되는 메카니즘은 Zeldovich의 반응기구라고 할 수 있다(김주은, 1995).



연소반응은 연소과정 중에 도달된 고온상태에서 식(4)에서처럼 산소 분자의 해리로부터 생성된 산소원자에 의해 식(5)에서 시작된다. 식(7)에서 연료에 대한 산소의 비율이 높아지게 되고 이 상태에서 OH기가 존

재하면 NO생성에 기여한다고 Lavcie(1986)는 보고하였다.

NO가 공기 중에서 서서히 산화하면 NO₂가 되고 실제로 건강에 장해를 유발시키는 것은 주로 NO₂로서 이는 사람이 호흡할 때에 체내에 침입해서 깊이 폐포에까지 도달하고 수 시간 내에 호흡 곤란을 수반한 폐수종 염증을 일으키는 독성이 강한 물질이다.

비등점은 21.3°C이고 비중은 1.59로서 생성속도는 연소가스의 온도와 산소농도에 영향을 받는다. 일반적으로 알려진 NO₂의 급성 피해는 그 자체가 직접적으로 눈에 자극을 주지 않을 뿐, NO₂가 점막 분비물에 흡착하여 산화성이 강한 질산을 형성하므로 호흡기 질환(기관지염, 기관지초염, 폐기종, 폐염)을 유발시키고 섬유성 폐색성 기관지초염 및 폐암까지도 일으킬 수 있다.

(3) 분진(Dust)

분진이라고 하면 일반적으로 고체상의 분진, fume, 액체상의 mist도 측정시 함유된다. 분진 중 비교적 무거워서 침강하기 쉬운 것을 강하분진(dust fall)이라고 하고 입자가 미세하고 가벼워서 침강하기 어려워 장기간 공중에 부유하는 것을 부유분진(suspended particles)이라고 한다. 쓰레기의 소각에 의해서 주로 발생하는 분진으로는 주로 부유분진인 무기성의 미세물질이지만 물리적으로 발생하는 것과 열화학적으로 발생하는 것으로 구분할 수 있고, 소량의 유기성 분진도 포함되어 있다. 대상소각시설인 연속연소식 스토카형 소각시설의 분진의 입경은 매우 광범위하게 분포하고 있는데 미세입자의 부유분진이 비교적 많으며, 30 μ m이하의 분진이 50~60%를 차지한다.

분진의 발생은 연소과정과 토양입자의 비산, 해양에서의 bubble jet

mechanism에 의하여 발생되기도 하나 대기중 가스상물질의 응축, 산화 중화반응, 입자상물질과의 반응 등을 통하여 2차적으로 생성되기도 한다 (Calvert *et al.*, 1978; Middleton *et al.*, 1978, 1980; Davis *et al.*, 1979).

또한, 분진은 태양광을 산란, 흡수시키므로 시정감소의 주요 원인물질로 작용하고, 구름속에 혼입되어 구름의 반사율을 변화시키고, 호흡을 통하여 인체의 기관지 및 폐내에 흡입되어 천식과 폐암을 유발시키기도 한다(Pitchford, 1982; Wolff, 1982; Appel *et al.*, 1985).

(4) 황산화물(Sulfur Oxides, SOx)

자연에 존재하는 화석연료인 석탄과 Oil류는 모두 0.1~0.5% 정도의 유황을 함유하고 있으며 소각물에도 일부 황성분이 함유되어 있어 연소시 이들이 공기 중의 산소와 결합하여 SO₂의 SO₃ 발생율은 40~80 : 1로 생성된다. SO_x로 표시되는 황산화물에는 아황산가스(SO₂), 삼산화황(SO₃), 아황산(H₂SO₃), 황산(H₂SO₄)등을 포함하나 배기가스 내에서는 주로 SO₂, SO₃ 형태가 주를 이루며 그 중 SO₂가 90%이상으로 배기가스 실측에 있어서는 SO₂를 주로 하고 있다.

분자량이 64.06인 불쾌한 자극취가 있는 무색의 불연성 기체로서 물에 잘 녹고, 초산, 에탄올, 클로로포름, 에테르에도 녹으며, 기체밀도는 2.9이고, 액체비중은 1.43이다. 이 물질은 수분이 존재할 때는 환원작용을 나타내며, 금속에 대해 부식성이 강하다. SO₂는 주로 호흡기계로 흡입 폭로되어 국소적인 자극과 부식성을 가지지만 SO₂로 형성된 산은 비교적 약산이며, 염산의 독성과 비슷한 정도이다(Elkin, 1958). 또 가용성이기 때문에 상기도 보다는 기관지와 호흡기에 장애를 일으킨다. 사람에 대해서 위기농도는 발생원에 있어서 150~190ppm이라고 보고되었지만,

다른 보고서에서는 65~245ppm의 농도에서 1~1.5시간은 견딜 수 있다고 보고되며, 8~12ppm 혹은 25~40ppm에서는 수 시간 견딜 수 있다고 한다(Flury 등, 1931). 또한, SO₂는 30~100ppm에서 2년간의 폭로에는 미각과 후각 이상의 산성화가 일어난다고 보고되고 있다(Kehoe, 1932).

SO₂는 매연보다 오염된 공기 중에 통상 존재하는 가스 성분으로 단독으로는 장애가 되지 않지만, 만성기관지염, 급성 아황산가스 질환, 심질환 그리고 소아의 급성호흡기 질환의 발생과 증상의 악화, 거기에 동반하는 시간과 관계하고 있다고 보고되고 있다(U. S. Public Health Service, 1949; WHO, 1961).

(5) 염화수소(HCl)

HCl은 수소 H와 염소 Cl의 화합물로서 상온에서 기체이며 무색, 자극성냄새를 갖고 있다. 분자량 36.47이며 융점 114.3℃, 비등점 -84.8℃, 비중(액체)은 1.265이다. 폐기물 소각 시 발생하는 HCl은 염소계 플라스틱의 유기성 화합물이 분해되는 과정에서 생성되는 염소원자가 발생원으로서 대부분의 연소공정에서 쉽게 HCl로 전환되어 생성된다. 그 주요 생성반응은 다음과 같다.



또한, 소각시설에서 배출되는 HCl은 노점 온도가 140℃ 이하로 내려가면 응축하여 금속을 쉽게 부식시키는 저온부식과 온도가 371℃ 이상이 될 경우 연소가스와 화학반응으로 인해 고온 부식을 일으킨다고 보고되어 있다(임계구, 1995). 이외에도 도시생활폐기물에 포함되어 있는 PVC를 연소시킬 경우 생성되며(Kaiser, E and Carotti, A, 1972), 연소로에서 NaCl이 SiO₂와 반응하면 HCl이 생성될 가능성이 크다고 보고되어 있다(Uchida *et al.*, 1983).

인체영향으로는 염화수소를 흡입하면 수증기와 결합하여 염산이 되어 상기도의 점막을 자극하여 카타르성 비염, 기침, 호흡곤란을 가져오며 심한 경우 폐출혈이나 폐부종을 일으켜 사망하게 된다.

(6) 다이옥신(Dioxin)

다이옥신류란 Fig. 3에서처럼 두 개의 벤젠환 가운데 산소가 두 개 연결된 다이옥신계화합물(Polychlorinated dibenzo *p*-dioxins, PCDDs)과 산소가 한 개 연결된 퓨란계화합물(Polychlorinated dibenzofurans, PCDFs)을 통칭하여 일반적으로 다이옥신류라고 한다. 두 개의 벤젠환의 치환기에 수소원자가 염소원자로 치환된 개수 및 위치에 따라 PCDDs는 75개, PCDFs는 135개의 이성체가 존재하여 다이옥신류는 총 210개의 이성체를 가진다. 특히 다이옥신류의 이성체 중 2, 3, 7, 8의 위치에 염소가 치환된 이성체(2,3,7,8-substituted congener) 17종이 생물에 대한 독성이 강하며, 그 중 가장 독성이 강한 것이 2,3,7,8-TCDD이다. 따라서 가장 독성이 큰 2,3,7,8-TCDD에 대한 상대적인 독성으로 계수를 산정한 후 각 동족체의 합을 독성등가량(Toxic equivalents, TEQ)로 표시한다.

다이옥신류의 다양한 독성실험에 관한 광범위한 연구들은 유전자 발현, 대사의 이상, 생식발달의 이상, 발암성, 갑상선 및 내분비계 장애 등 매우 다양한 작용을 보여주고 있다(US EPA, 1985; Safe, 1990; Mocarelli *et al.*, 1996).

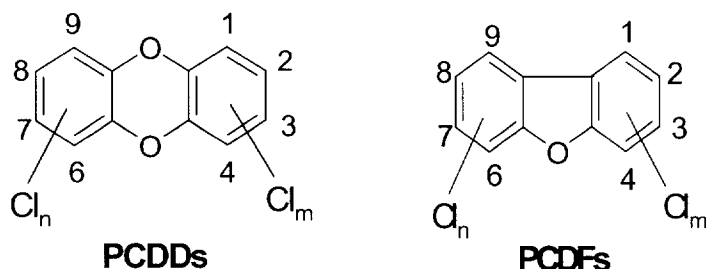


Fig. 3. Molecular structures and numbering systems of PCDDs and PCDFs.

최근, 다이옥신류의 용어는 PCDDs/DFs와 유사한 독성과 생물학적 영향을 가지는 Dioxin-like PCBs(DLPCBs)를 포함한다. 폴리염화비페닐(PCBs)은 Fig. 4와 같이 두 개의 벤젠환에 염소가 치환되어 있는 구조를 가지고 있으며, 염소원자 치환 위치와 개수에 따라 총 209종의 이성체를 가진다. 이들 중 두 개의 벤젠환이 동일 평면에 위치하여 *ortho* 위치에 염소를 포함하지 않은 Non-*ortho* PCBs와 *ortho* 위치에 하나의 염소가 치환된 Mono *ortho* PCBs 12종의 화합물이 다이옥신류와 유사한 독성영향과 위해성을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다(WHO, 1997).

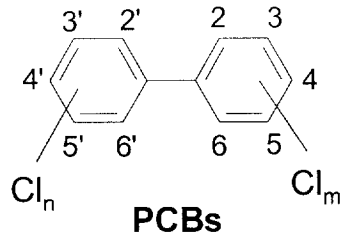


Fig. 4. Molecular structures and numbering systems of PCBs.

다이옥신류의 주요한 발생원은 산업 및 생활 폐기물 소각, 펄프 제조 공정 중 염소표백 및 살균, 금속 및 비철금속의 제련과 정련, 펜타클로로 페놀(Pentachlorophenol, PCP)과 폴리염화비페닐(Polychlorinated biphenyls, PCBs)등 유기염소계 화합물의 제조와 같은 각종 산업공정 중에서 생성되는 것으로 보고되고 있다(Olie *et al.*, 1977; Hutzinger *et al.*, 1985; Rappe *et al.*, 1991; Harrad and Jones, 1992; Webster and Connett, 1998).

Ⅲ. 연구대상소각시설의 공정현황

1. 소각시설의 개요

본 대상소각시설은 1995년 8월 30일 완공, 1995년 9월 1일 가동개시되어 현재까지 정상 가동되고 있는 200톤/일 × 1기의 연속연소 Stoker방식의 소각시설이다. 주요공정은 반입공급설비, 소각설비, 연소가스냉각설비, 연소가스처리설비, 재반출설비, 폐수처리설비로 나누어져 있다. 이에 대한 주요시설로는 크레인, 소각로, 폐열보일러, 전기집진기, 활성탄주입설비, 습식세정탑, 선택적촉매환원장치, 폐수처리장 등으로 구성되어 있다. 연구대상소각시설의 주요설비현황에 대해서는 Table 3에 나타내었고, Fig. 5에서는 전체계통도를 나타내었다.

Table 3. Process Item of principal incineration plant.

Section	Equipment Item	Capacity	Type	Nurmer
Input supply equipment	Refuse Crane	2m ³	Overhead	2
Incineation equipment	Incinerator	200ton/hr	Stoker	1
Combustion gas cooling equipment	Wasteheat Bolier	26.7ton/hr	Spray	1
Combustion gas treatment equipment	Activated Carbon System	5m ³	Air	1
	Felectric Precipitation	59,225Nm ³ /hr	Dry	1
	1st Wet Scrubber	60,000Nm ³ /hr	Spray	1
	2nd Wet Scrubber	59,225Nm ³ /hr	Spray	1
	Selective catalytic -reduction	57,680Nm ³ /hr	Auto catalytic	1
Ash output equipment	Ash Crane	1m ³	Overhead Under	1
Waste water treatment equipment	Waste water plant	120m	Physical · Chemical treatment	1

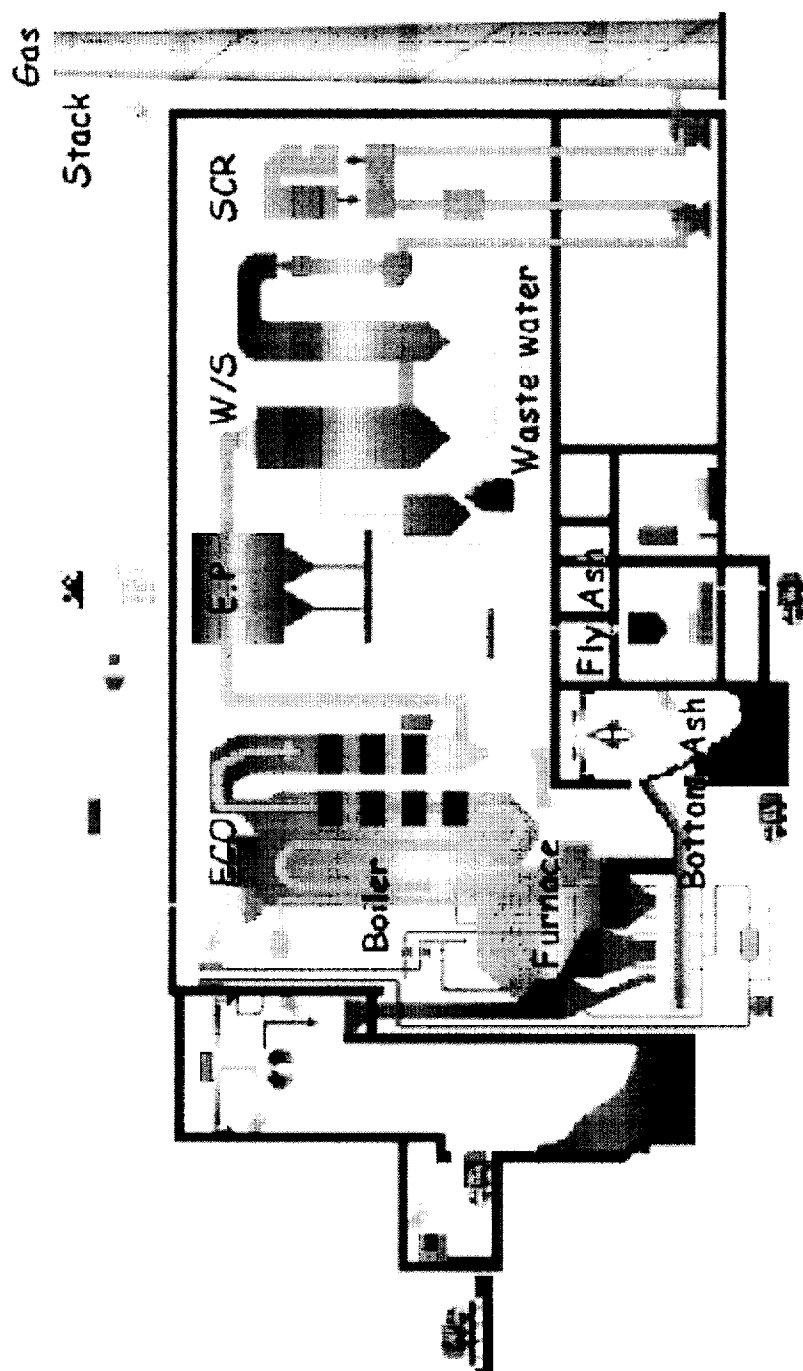


Fig. 5. Outline of MSWI Plant

2. 소각시설의 주요공정별 특성

소각시설의 공정전반에 대한 일반적인 운전조건을 갖추기 위한 방법으로 우선 소각대상 폐기물의 적정 혼합 및 균질화가 요구되고 있다. 이러한 이유는 폐기물의 질이 일정하게 유지되기 어렵고 폐기물의 발열량 및 수분함량의 변화가 로내 연소조건에 상당한 영향을 미쳐 대기오염물질의 농도를 증가시키는 원인이 된다.

본 연구대상시설의 소각로내 연소가스의 흐름은 연소단 상부에 정류관을 설치, 배기가스의 흐름을 2회류식으로 유도하여 연소가스가 반대방향의 병류로 흘러 후연소실에서 두 흐름이 완전히 혼합 연소됨으로써 향류식 및 병류식의 장점을 살려 최적의 쓰레기 연소상태를 유지하고 있다. 로내 화격자 구성은 Table 4와 같이 건조구역, 연소구역, 후연소구역으로 나누어져 있다. 구역별로 수직으로 구분되어 각 구역은 가동화격자 8열, 고정화격자 7열로 화격자 사이에 배열되어 전·후진과 상·하 운동(Forward and Backwards, Up and Down)으로 이루어져 경사진 화격자 위의 쓰레기를 앞으로 밀면서 동시에 좌우로 혼합, 교반시킨다.

Table 4. Types of Stoker on Incinerator

Item	length (m)	width (m)	dimension (m ²)	effective dimension (m ²)	slope (°)
Dry Stoker	2.5	4.14	10.35	6.21	15
combustion stoker	5.0	4.14	20.70	20.70	15
Post-combustion stoker	4.5	4.14	18.63	18.63	7.5
Total	12.0		49.68	45.54	

가동화격자의 가동속도는 분당 0~5 왕복행정으로 중앙제어실 (DCS)에서 원격조정이 가능하도록 설계되어 있으며, 화격자의 유효면적은 45.5 m², 연소실 유효용적은 153m³으로 설계되어 있다.

연소공기는 1차 공기 및 2차 공기와 냉각공기로 구분하여 소각로에 공급되는데 1차 연소공기는 화격자 하부의 호퍼(Hopper)에 압입되어 화격자의 공기구멍을 통해 쓰레기층과 접촉하여 연소를 촉진시킨다. 1차 공기 덕트 내부에는 일정 압력을 유지시키며, 연소가스내의 과잉 공기는 산소가 6~12% 되도록 하고 화격자의 속도에 따라 공기량을 제어할 수 있도록 설계되어 있다. 또한, 1차 연소공기는 증기식예열기(Steam Air Heater)를 통해 공기온도를 170℃까지 가온시켜 공급할 수 있다.

2차 연소공기는 불완전 연소가스와 효율적인 혼합으로 완전연소를 위해 노벽면과 천정 그리고 로내 후연소 구역으로 유입되어 로내의 온도에 따라 공급량이 제어되며, 냉각 공기는 용융된 연소재가 노내벽에 융착되는 것을 방지하기 위해 화격자 상부측벽에 있는 구멍을 통해 공급된다.

소각로에서 소각 후 배출되는 연소가스는 연소가스냉각공정인 수관식 폐열보일러(Waste Heat Boiler) 및 절탄기(ECO)를 거치는데 여기서 발생하는 증기발생량의 설계치는 26.7ton/h에 16kg/cm²으로 고온의 연소가스를 냉각시켜 연소가스처리공정으로 유입된다.

유입된 연소가스는 비산먼지의 집진설비인 전기집진기(Electrostatic Precipitator)에서 Dust를 제거하는데 이때, 유입되는 Dust농도 3g/Nm³가 전기집진기를 통과한 후에 30mg/Nm³ 이하가 되도록 설계되어 있으며, 발생한 분진은 별도 이송장치를 통해 Bag에 포집하고 있다.

전기집진기를 통과한 배기가스는 1차 습식세정탑(Wet Scrubber)으로 유입되는데, 고압의 순환세정수가 12개의 분사노즐을 통해 세정탑내의 배기가스의 흐름층에 불분사를 하게 된다. 1차 습식세정탑 내의 순환세

정수는 배가스내의 산성가스인 HCl, SOx 뿐 아니라 중금속 물질들도 포함되어 있기 때문에 NaOH 25% 희석액을 일정량 투입하여 순환세정수의 pH를 4~5정도로 운전되도록 자동조정하고 있다.

1차 습식세정탑을 통과한 배기가스는 2차 습식세정탑으로 이송되는데 운전방법은 1차와 동일하며 분사노즐이 5개로 구성되어 분사되며 순환세정수의 pH는 7~8로 운전하고 있다. 또한 습식세정탑내의 순환세정수는 상수도에서 약 3.5~4.0m³/hr 정도를 항시 보충하여 순환하고 있으며, 보충된 양만큼은 폐수처리장으로 이송시켜 물리·화학적 방법으로 폐수처리토록 하고 있다. 이때, 유입된 상수도의 수리학적 체류시간 HRT는 약 6~7시간 정도로서 조정 운전되고 있다.

습식세정탑을 통과한 배기가스는 비산먼지와 유해산성가스성분이 대부분 제거된 상태에서 Duct Burner에 의해 약 280℃~320℃까지 승온된 상태로 선택적촉매환원장치(SCR)로 유입되는데 NOx를 제거하기 위해 NH₃를 일정량씩 분무하여 NOx가 촉매와 반응하여 H₂O, N₂로 전환되도록 운전하게 된다. 또한, Dioxins을 일부 산화시키고 촉매의 표면층에 흡착제거하는 기능도 가지고 있다.

여러 방지시설을 통과한 배기가스는 굴뚝(Stack)을 통하여 대기중으로 최종 배출하게 되어 있는데, 굴뚝의 주요기능은 연소배기가스가 대기중으로 배출되면서 자연확산이 용이하도록 되어 있으며, 굴뚝을 통해 배출되는 대기오염물질은 굴뚝자동측정장치를 통해 실시간 배기가스의 CO, NOx, SOx, HCl, Dust, O₂ 등을 자동 측정토록 하고 있다.

3. 조사기간

본 연구는 도시생활폐기물 소각시설에서 배출되는 오염물질의 농도 수준과 특성을 파악하고 이들 물질의 배출농도와 그에 따른 소각시설의 운전요소와의 상호간의 연관성을 파악하여 대기오염예방을 위한 적정 운전조건을 파악하기 위한 기초연구로서 실시되었다.

조사기간은 1999년 1월부터 2003년 12월까지 5년에 걸쳐 월 2회씩 실시하였으며, 연구대상시료는 굴뚝에서 대기로 배출되는 배출가스, 반입 폐기물, 소각시설 가동시의 운전요소로 구분하였고, 동일한 조사 기간 중에 측정 및 시료채취 후 분석을 수행하였다.

Table 5에서는 조사일정에 따른 시료채취 기간을 Label로 표시하여 월별, 일자별로 구분하여 나타내었다.

Table 5. Sampling periods and each label for air samples

Label	Sampling periods					The last of season
	'99	'00	'01	'02	'03	
A1	12	8	12	11	9	January
A2	28	17	26	24	24	
A3	8	11	9	8	7	February
A4	22	21	23	22	21	
A5	8	10	10	6	12	March
A6	16	22	20	23	28	
A7	9	8	11	4	9	April
A8	26	21	25	24	25	
A9	10	10	10	8	12	May
A10	24	22	21	24	27	
A11	7	9	11	12	13	June
A12	23	19	25	21	24	
A13	-	6	13	12	-	July
A14		23	20	26	-	
A15	9	10	-	8	-	August
A16	23	25	-	22		
A17	6	8	7	6	-	September
A18	26	25	25	23	-	
A19	8	6	4	11	10	October
A20	25	20	22	21	20	
A21	11	10	12	6	4	November
A22	25	23	23	22	21	
A23	10	11	13	4	5	December
A24	20	22	20	26	19	

4. 시료채취 및 분석방법

4.1 굴뚝에서의 대기오염물질 측정

연구대상소각시설에 설치되어 있는 굴뚝에서의 오염물질 농도측정은 굴뚝상단의 측정공을 통하여 대기로 배출되는 배기가스를 포집·분석하여 그 중에 함유되어 있는 대기오염물질인 CO, NO_x, DUST, SO_x, HCl를 굴뚝자동측정기를 통해 측정하였다. Table 6은 굴뚝자동측정기 제조사양 및 측정방법에 대해 나타내었다.

Table 6. The Composition of TMS facilities

ITEM	MADE	RANGE	METHOD
NO _x Analyzer	API(USA)	0~500ppm	CHEMILUMINESCENCE
SO ₂ Analyzer	FUJI(JAPAN)	0~500ppm	NDIR
HCl Analyzer	DKK(JAPAN)	0~100ppm	ELECTRODES
Dust Analyzer	ESC(USA)	0~100mg	LIGHT BACK SCATTERING
CO Analyzer	API(USA)	0~1,000ppm	NDIR
Data Logger System	SOWAN CO.(KOREA)	4~20mA, 110V	REMOTE CONTROL

4.2 폐기물의 시료채취 및 성분분석

본 연구대상소각시설에서 대상폐기물의 성상과 물리적 특성을 파악하기 위해 대기오염물질 측정일자와 동일한 일자에 저장병커에 저장되어 있는 폐기물을 채취·분석하였다. 폐기물 성분분석은 당일 반입되는 생활쓰레기를 충분히 혼합하여 원추4분법으로 시료를 분취한 후 물리적조성은 채취한 시료를 종이류, 음식물류, 나무류, 플라스틱류, 불연물류 등의 6개 항목으로 분류하여 각각 전자식 저울로 무게를 측정하였다. 삼성분은 분류된 시료를 90℃를 유지하는 건조기에서 3일간 건조하고 건조 전·후의 무게를 측정하여 수분을 측정하였고 건조가 끝난 시료는 파쇄한 후 전기로를 이용하여 800±250℃에서 1시간이상 항량이 된 후 회분을 측정하고 최종 가연분을 측정하였다. 겉보기비중은 30cm 높이에서 3회 낙하하여 시료용량을 채운 후 질량/부피로 구하였다. 발열량은 봄베 열량계로 측정하여 수소(H) 성분을 보정한 후 저위발열량을 구하였다.

4.3 소각시설의 운전자료 조사

연구대상소각시설의 운전자료 조사는 각 공정별로 설치되어 운전되고 있는 설비의 운전Data를 각종 계장기기를 이용하여 측정한 후 중앙제어실(DCS)로 실시간으로 전송된 자료를 토대로 대기오염물질에 직·간접적으로 영향을 주는 운전요인 인자를 추출하여 조사하였다.

조사항목으로는 소각량, 재(Ash) 감열감량을 비롯해 공정별 운전온도, 공기량 등 운전요소 전반 및 약품사용량 등의 Utility 전반에 대해 조사를 수행하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 대기오염물질 배출농도 및 운전요소와의 관계해석

1.1 폐기물의 성상 및 물리적 특성 비교

본 연구에서 도시생활폐기물의 물리적 조성, 삼성분, 밀도, 발열량 등의 일반적인 폐기물 성상 특성은 소각시 연소효율과 소각 후 발생하는 대기오염물질의 농도변화에 많은 영향을 미치는 요소로서 지적될 수 있으며, 이 중 폐기물을 최초 반입하여 소각하는 과정에서 우선적으로 관리되어야 할 항목중의 하나로써 폐기물 발열량을 지적할 수 있다.

폐기물 발열량은 소각시설의 운전변화에 대응하는데 있어 아주 중요한 변수중의 하나로써 다년간의 변화추이를 통해 대상폐기물의 물리적 조성 및 삼성분의 특성을 파악할 수 있고 이들 상호간에 직·간접적으로 어떤 영향을 미치며, 어떤 변화추이를 보였는지에 대한 연관성을 살펴볼 필요가 있다.

Fig. 6에서의 폐기물 발열량 변화추이를 보면 1999년에서 2001년까지의 발열량은 대상소각시설의 설계기준인 1,400kcal/kg 수준에서 크게 벗어나지 않는 범위에서의 변화추이를 나타내는 경향을 보였으나, 2002년 이후에는 측정기간별로 많은 변화를 보여주고 있다. 2002년 4월(A8)에 발열량이 1,900kcal/kg까지 상승하였다가 8월(A15)에 1,400kcal/kg까지 점진적으로 감소되는 경향을 보였는데 발열량의 상승시점인 4월(A7~A8)이 대상소각장으로 반입되는 폐기물의 성상이 급격히 변화하는 시작한 시점으로 나타났고 이후 8월(A15)까지 감소되는 패턴을 보인 것은 발열량 상승에 따른 소각로 입열부하 증가에 대비한 소각시설 운전Mode 변경에

따른 것으로 파악되었다.

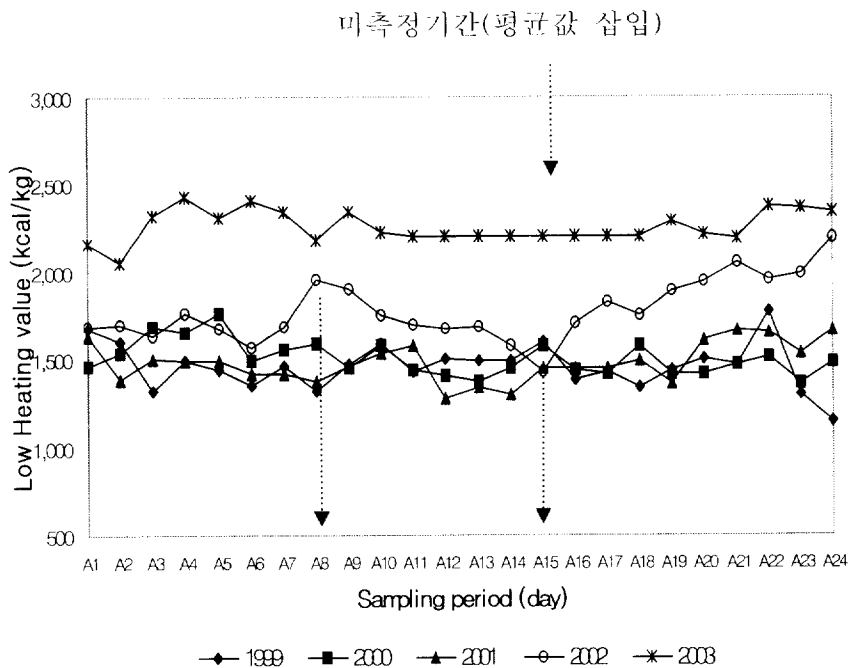


Fig. 6. Variation of low heating value from 1999 to 2003.

운전Mode 변경으로는 폐목재(발열량 5,876kcal/kg)의 소각량 감소(6톤 → 5톤), 쓰레기오수 분사를 통한 소각로 연소실 온도조절(990℃ → 950℃), 연소용 1차 공기온도의 조절 등으로 발열량이 감소되었음에도 불구하고 8월(A16)부터 다시 상승하기 시작하여 11월(A21)에 2,000kcal/kg을 초과, 2003년에는 2,300kcal/kg 범위까지 상승하는 추이를 보였다. 이는 문전수거 및 음식물쓰레기 분리수거의 완전정착에 따른 폐기물 반입지역별로 주거 형태, 수거방식 등이 크게 개선되어 대상소각장의 반입폐기물 특성이 가연성 위주로 변화되고 있음을 의미한다.

또한, 쓰레기 오수의 다량 분사와 연소용 공기온도의 지속적인 저감 투입은 연소실 내화물을 침식시키고 소각로 화격자 등의 저온부식과 폐

열보일러내의 검댕(Soot) 발생으로 증발관 막힘 현상을 유발시켜 운전조건 변경에는 한계가 있는 것으로 파악되었다.

2002년 8월(A15)에 일시적으로 발열량이 매우 낮게 나타난 것은 그해 우수기 때 폭풍과 더불어 강우량의 증가에 따른 함수율이 과대 증가한 것이 원인으로 판단되며, 2003년에 폐기물 발열량이 어느 정도 일정한 분포를 보여주는 것은 이 시기에 비교적 폐기물의 성상이 안정된 상태를 유지하고 있는 상태로써 함수율이 45%정도를 유지하는 것으로 나타났다.

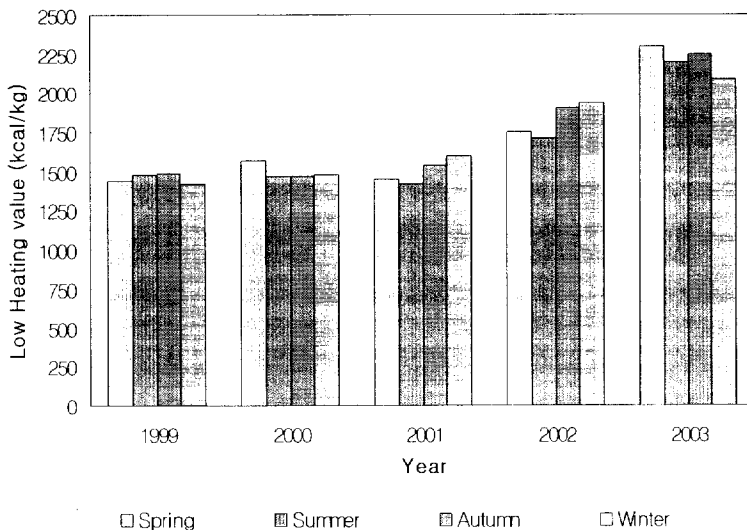


Fig. 7. Seasonal variation of low heating value from 1999 to 2003.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 폐기물 발열량은 계절적인 영향을 다소 받고 있는 것으로 나타났다. 쓰레기 발생원에서 봄, 가을철 기간보다 여름철 기간이 다소 발열량이 낮아지는 경향을 보였으며, 여름철 우수기의 잦은 쓰레기의 반입에 따른 결과로 판단되며, 이는 쓰레기의 성상에 대한 함수율의 변화에 기인한 것으로 분석되었다.

발열량의 변화는 2001년부터 계절별로 조금씩의 차이를 보였으며, 여름철에 다소 낮은 분포를 보여주고 있으나, 2001년 이전의 경우에는 계절별로 변화가 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 이는 당시에 여름철 젖은 쓰레기의 반입으로 오수가 과다발생 되었음에도 불구하고 폐기물 발열량이 낮아 오수의 소각로내 투입량을 감소시킨 것이 원인이었으며, 폐기물의 성상이 일정 수준을 유지한 결과인 것으로 나타났다.

그러나, 2001년에서 2002년을 기점으로 발열량은 계절별로 일부 변동을 보여주는데 여름철에 전반적으로 낮은 분포를 보인데 반해 봄, 가을, 겨울의 발열량은 비교적 높게 나타났다. 이는 쓰레기 성상이 좋아짐에 따라 소각로내 온도가 증가되어 여름철에 대량 발생한 젖은 쓰레기의 오수를 소각로내 투입량을 증가시킨 것이 주된 원인이었으며, 반입특성이 수시로 변함에 따라 계절적인 변동을 받는 것으로 나타났다. 본 연구결과 소각시설을 운전하는데 있어 중요한 운전 지표중 하나인 발열량의 적정 관리를 위해서는 쓰레기오수 관리가 우선적으로 수반되어야 하며, 운전조건에 따라 적정 투입량을 선정하여 투입할 필요성이 확인되었으며, 발열량의 상시확인과 오수발생 및 투입량의 상관관계 지표를 수립할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

따라서, 폐기물 발열량에 영향을 미치는 각각의 요소들이 상호간에 어떠한 상관성을 보였는지를 알아보기 위하여 Table 7에는 1999년에서 2003년까지 각 측정기간 동안의 분석결과인 소각대상폐기물의 삼성분, 물리적 조성, 밀도, 발열량 측정치를 나타내었다.

Table 7. The Characteristics of Waste

1999	Physical Composition(%)					Proximate Analysis(%)			Density (ton/m ³)	Low Heating Value (kal/kg)
	Paper	Plastics	Wood	Food	Non-Fired	Moisture	Combustibles	Non-Combustible		
A1	28.1	15.4	2.1	51.7	2.7	56.8	35.2	8.0	0.308	1,674
A2	27.5	17.4	2.1	50.2	2.8	54.9	37.0	8.1	0.285	1,595
A3	22.4	15.1	2.2	57.6	2.7	59.6	33.1	7.3	0.338	1,313
A4	26.9	15.5	2.3	52.7	2.6	52.3	39.6	8.1	0.308	1,494
A5	25.4	15.8	2.4	53.4	3.0	54.1	37.2	8.7	0.312	1,437
A6	23.7	17.6	3.0	52.8	2.9	57.7	34.4	7.9	0.333	1,354
A7	30.8	20.5	2.8	42.4	3.5	56.1	34.7	9.2	0.307	1,456
A8	34.3	17.1	2.8	42.8	3.0	56.2	34.2	9.6	0.316	1,315
A9	31.7	20.5	3.1	40.7	4.0	54.7	35.4	9.9	0.306	1,468
A10	28.5	22.3	2.6	43.6	3.0	60.9	31.2	7.9	0.319	1,590
A11	29.1	21.5	1.9	46.2	1.3	60.0	33.6	6.4	0.316	1,429
A12	28.7	25.5	1.2	43.2	1.4	58.1	35.5	6.4	0.308	1,497
A15	28.8	19.2	1.2	49.0	1.8	55.3	37.2	7.5	0.306	1,599
A16	30.5	20.9	1.0	45.4	2.2	54.5	37.9	7.6	0.291	1,379
A17	30.3	17.2	1.1	49.4	2.0	56.2	36.4	7.4	0.296	1,430
A18	26.5	19.8	2.6	47.7	3.4	55.3	36.2	8.5	0.285	1,335
A19	32.3	20.1	3.5	41.4	2.7	51.0	40.2	8.8	0.274	1,434
A20	24.0	25.4	1.8	45.1	3.7	60.5	31.7	7.8	0.326	1,497
A21	33.8	18.7	2.5	42.5	2.5	59.4	34.2	6.4	0.324	1,472
A22	28.9	17.6	3.4	48.3	1.8	55.1	39.2	5.7	0.289	1,774
A23	24.0	19.3	3.5	51.2	2.0	59.9	35.7	4.4	0.325	1,296
A24	23.7	16.5	3.8	53.5	2.5	60.5	34.3	5.2	0.329	1,346

2000	Physical Composition(%)					Proximate Analysis(%)			Density (ton/m ³)	Low Heating Value (kal/kg)
	Paper	Plastics	Wood	Food	Non-Fired	Moisture	Combustibles	Non-Combustible		
A1	34.5	15.8	3.5	44.0	2.2	54.5	38.4	7.1	0.285	1,462
A2	36.7	14.5	4.2	42.0	2.6	52.2	40.5	7.3	0.283	1,530
A3	38.2	15.8	3.8	39.4	2.8	52.4	37.1	10.5	0.285	1,680
A4	34.7	13.5	4.2	44.4	3.2	52.7	36.7	10.6	0.295	1,656
A5	33.6	16.5	2.9	46.0	2.1	56.6	34.8	8.6	0.295	1,757
A6	34.5	15.3	1.9	53.0	2.3	55.3	36.8	7.9	0.293	1,490
A7	28.7	13.3	2.1	53.4	2.5	55.9	34.9	9.2	0.295	1,558
A8	30.3	15.2	1.8	51.0	1.7	53.1	38.7	8.2	0.290	1,586
A9	34.5	13.3	1.3	49.1	1.8	55.5	36.2	8.3	0.291	1,449
A10	36.7	14.8	0.8	46.0	1.7	52.9	38.6	8.5	0.290	1,582
A11	33.6	13.9	1.8	49.5	1.2	56.1	36.7	7.2	0.294	1,436
A12	31.9	15.8	2.3	48.2	1.8	55.8	36.4	7.8	0.294	1,403
A13	34.8	14.6	2.0	47.1	1.5	59.7	32.8	7.5	0.365	1,367
A14	33.6	14.6	1.7	48.5	1.6	57.9	34.8	7.3	0.353	1,451
A15	35.5	13.3	1.5	47.9	1.8	55.1	36.4	8.5	0.295	1,577
A16	36.7	12.6	1.8	47.6	1.3	59.0	34.0	7.0	0.355	1,441
A17	34.4	14.5	1.9	47.2	2.0	57.0	34.7	8.3	0.349	1,416
A18	32.5	16.8	1.8	47.0	1.9	58.1	33.6	8.3	0.350	1,582
A19	32.5	14.6	1.1	49.3	2.5	58.8	31.2	10.0	0.352	1,412
A20	33.3	13.2	1.8	49.4	2.3	59.8	30.3	9.9	0.354	1,414
A21	35.2	14.7	1.9	45.5	2.7	58.7	32.3	9.0	0.352	1,475
A22	33.1	14.5	1.4	47.8	3.2	57.7	32.0	10.3	0.348	1,510
A23	32.4	13.8	2.0	49.0	2.8	60.0	30.2	9.8	0.351	1,362
A24	30.8	12.9	2.8	50.5	3.0	58.2	32.0	9.8	0.349	1,478

Table 7. Continued

2001	Physical Composition(%)					Proximate Analysis(%)			Density (ton/m ³)	Low Heating Value (cal/kg)
	Paper	Plastics	Wood	Food	Non-Fired	Moisture	Combustibles	Non-Combustible		
A1	30.3	16.5	0.7	49.2	3.3	56.5	33.8	9.7	0.343	1627
A2	32.3	13.6	0.9	50.4	2.8	59.8	31.3	8.9	0.354	1383
A3	33.7	14.3	1.0	47.9	3.1	54.8	35.7	9.5	0.339	1503
A4	33.5	15.7	0.8	46.8	3.2	56.2	34.3	9.5	0.340	1496
A5	34.2	14.8	1.6	46.3	3.1	55.4	35.6	9.0	0.356	1489
A6	36.7	11.2	1.5	45.2	3.4	57.1	33.2	9.7	0.347	1414
A7	37.8	12.3	0.8	46.2	2.9	56.0	34.4	9.6	0.345	1418
A8	32.7	11.9	1.8	50.1	3.5	58.1	31.5	10.4	0.350	1371
A9	33.7	12.7	2.4	47.3	3.9	54.5	35.1	10.4	0.337	1462
A10	30.6	14.2	2.9	48.6	3.7	55.4	34.8	9.8	0.342	1530
A11	35.0	14.1	1.8	45.9	3.2	55.6	35.3	9.1	0.342	1578
A12	30.5	14.9	2.7	48.4	3.5	59.7	31.2	9.1	0.380	1278
A13	33.7	13.2	2.9	46.4	3.8	57.1	33.0	9.9	0.349	1339
A14	35.4	12.5	1.5	47.1	3.5	55.2	35.1	9.7	0.343	1301
A17	38.5	11.4	0.9	46.0	3.2	56.5	33.8	9.7	0.345	1446
A18	39.3	10.6	1.8	45.4	2.9	56.0	35.6	8.4	0.346	1491
A19	36.6	15.7	0.9	42.9	3.9	60.9	29.9	9.2	0.382	1367
A20	35.8	13.4	1.5	45.8	3.5	54.8	35.5	9.7	0.347	1608
A21	35.3	13.1	0.8	47.5	3.3	56.9	34.0	9.1	0.357	1659
A22	37.2	14.3	0.5	45.1	2.9	55.6	35.3	9.1	0.346	1655
A23	35.0	13.7	0.8	48.0	2.5	59.3	33.1	7.6	0.380	1533
A24	33.7	12.6	1.4	48.4	3.9	56.8	33.0	10.2	0.357	1664

2002	Physical Composition(%)					Proximate Analysis(%)			Density (ton/m ³)	Low Heating Value (cal/kg)
	Paper	Plastics	Wood	Food	Non-Fired	Moisture	Combustibles	Non-Combustible		
A1	33.8	14.3	3.5	45.5	2.9	55.2	35.7	9.1	0.344	1686
A2	34.5	12.4	4.8	45.2	3.1	53.9	37.0	9.1	0.342	1691
A3	32.6	11.4	5.5	46.7	3.8	54.5	36.8	8.7	0.344	1635
A4	33.3	12.8	6.2	44.9	2.8	53.1	38.8	8.1	0.340	1764
A5	35.6	11.6	4.2	46.2	2.4	54.1	38.5	7.4	0.342	1678
A6	38.2	12.7	4.8	45.2	3.1	53.8	38.0	8.2	0.351	1567
A7	34.2	12.4	5.3	44.6	2.5	53.6	36.7	9.7	0.340	1684
A8	35.4	14.7	4.5	43.2	2.2	50.2	41.7	8.1	0.388	1950
A9	31.7	15.1	5.3	44.2	3.7	51.9	38.9	9.2	0.350	1899
A10	35.0	13.2	4.7	43.9	3.2	52.3	39.3	8.4	0.353	1754
A11	32.0	14.2	5.6	45.4	2.8	54.9	37.6	7.5	0.354	1699
A12	32.5	15.3	3.8	45.1	3.3	55.6	36.3	8.1	0.353	1678
A13	33.9	12.8	4.5	45.9	2.9	53.0	38.1	8.9	0.350	1689
A14	33.5	12.5	4.8	46.1	3.1	54.7	37.1	8.2	0.353	1679
A15	34.3	11.8	4.7	46.3	2.9	54.6	37.7	7.7	0.356	1729
A16	36.2	13.2	4.5	43.5	2.6	53.0	39.1	7.9	0.350	1706
A17	34.7	14.0	5.5	42.4	3.4	51.7	39.5	8.8	0.340	1828
A18	36.5	12.4	5.7	41.8	3.6	51.0	39.8	9.2	0.340	1748
A19	36.1	12.8	5.3	42.0	3.8	49.3	41.4	9.3	0.338	1893
A20	36.2	13.7	5.1	41.5	3.5	49.0	42.9	8.1	0.336	1942
A21	36.5	14.7	5.5	40.2	3.1	50.0	41.7	8.3	0.337	2053
A22	38.5	13.5	5.2	39.8	3.0	48.7	43.0	8.3	0.335	1956
A23	39.4	14.2	4.7	38.2	3.5	47.7	43.3	9.0	0.333	1989
A24	39.3	15.4	4.9	37.3	3.1	44.9	46.6	8.5	0.320	2188

Table 7. Continued

2003	Physical Composition(%)					Proximate Analysis(%)			Density (ton/m ³)	Low Heating Value (kal/kg)
	Paper	Plastics	Wood	Food	Non-Fired	Moisture	Combustibles	Non-Combustible		
A1	40.2	14.8	4.5	36.8	3.7	45.0	45.6	9.4	0.334	2,154
A2	38.1	14.4	4.7	39.4	3.4	47.2	44.3	8.5	0.337	2,050
A3	39.1	16.2	6.3	35.2	3.2	43.9	44.3	11.8	0.328	2,323
A4	39.8	16.8	5.9	34.0	3.5	43.1	44.4	12.5	0.320	2,432
A5	38.3	15.5	5.7	36.7	3.8	43.8	43.2	13.0	0.325	2,313
A6	36.2	17.4	5.4	38.5	2.5	44.6	44.6	10.8	0.329	2,412
A7	39.1	16.8	3.7	37.2	3.2	43.7	44.7	11.6	0.310	2,339
A8	40.4	14.7	3.4	38.5	3.0	46.0	43.5	10.5	0.335	2,176
A9	38.8	16.8	2.3	39.4	2.7	44.1	46.2	9.7	0.310	2,343
A10	41.0	14.3	2.7	39.5	2.5	44.8	46.2	9.0	0.310	2,226
A11	41.5	14.2	2.7	39.1	2.5	45.0	45.4	9.6	0.320	2,200
A12	39.6	16.5	2.0	39.0	2.9	47.1	43.5	9.4	0.330	2,200
A19	36.0	18.9	5.1	36.8	3.2	44.0	48.6	7.4	0.250	2,289
A20	37.3	18.1	4.8	37.1	2.7	46.9	46.4	6.7	0.277	2,211
A21	38.0	18.7	3.2	37.4	2.7	47.9	45.6	6.5	0.331	2,186
A22	37.9	19.4	4.0	36.6	2.8	46.5	47.1	6.4	0.300	2,372
A23	38.4	19.1	3.6	36.2	2.7	48.1	45.7	6.2	0.307	2,369
A24	34.5	21.3	3.0	38.5	2.7	47.6	46.0	6.4	0.305	2,346

폐기물의 삼성분 및 물리적 조성의 변화에서 물리적 조성은 년도에 따라 많은 차이를 보였으며, 대체로 음식물류와 종이류에서 많은 변화가 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에 나타난 폐기물의 물리적 조성별 연간 변화추이에서는 음식물류와 종이류의 변화가 큰 것으로 확인되었다. 음식물류는 1999년에서 2001년까지는 47~48% 범위의 분포를 보였으나 2002년에 42%로 급격한 변화추이를 나타내었고 2003년에는 36%로 약 10%의 함량 변화를 나타내었다. 반면, 종이류는 1999년에 27%로 나타났으나 이 시점에서 함량 변화가 급격히 시작되었으며, 2000년에서 2002년까지는 비교적 일정한 비율인 33~34%를 유지하는 결과를 보였지만, 2003년에 37%까지 상승하여 약 10%의 함량 변화를 나타내었다. 대체로 음식물류와 종이류는 비슷한 함량비율을 나타내고 있으나 급격한 상승 및 감소추이는 각각 다른 것으로 나타났다.

이는 폐기물의 분리수거 정착과정에서 가연성분의 증가추세는 1999년에, 음식물류의 감소추세는 2001년을 기점으로 시작되었음을 알 수 있다.

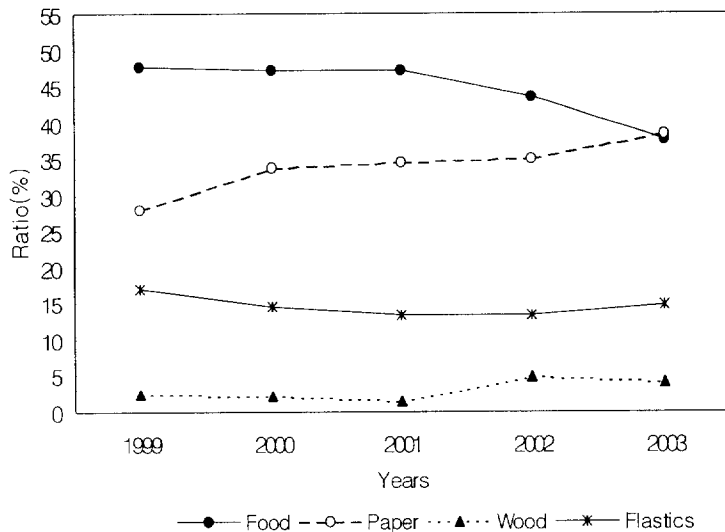


Fig 8. Variation of physical composition on solid waste from 1999 to 2003.

이외에도 나무류는 전반적으로 큰 변화추이를 보이지 않았지만 2002년부터 반입지역의 폐목재 과다발생에 따른 대상소각시설로의 반입 증가가 폐기물의 발열량 상승에 일부 기여한 것으로 판단된다. 이후 폐목재는 거의 일정한(3%대) 수준으로 반입되어 적정하게 혼합 후 소각하였음을 알 수 있다. 특히, 오염물질 생성 유발 가능성이 큰 플라스틱의 조성은 1999년 이전에는 17%에서 분포하다 이후 평균 15%대에서 일정한 비율로 분포되고 있어 본 대상시설에서 플라스틱으로 인한 대기오염물질 발생조건은 다소 감소되었다고 볼 수 있으며, 불연물은 3%대에서 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 9에는 폐기물 삼성분인 수분, 가연분, 회분의 연간 변화추이를

나타내었으며, 수분은 1999년에는 57%까지 상승하였지만, 2001년까지 55~56%의 정도의 함량을 유지하고 있다. 이후 음식물쓰레기 분리수거 정착 등으로 인해 2002년까지 급속히 감소되는 경향을 보였는데, 2003년에는 평균 45% 정도로 유지되고 있다.

가연분도 발열량 증가와 더불어 증가 추세가 두드러지게 나타났으며 연도별 변화 추이를 보면, 1999년에서 2001년까지는 35%, 2002년에 40%, 2003년에는 45%로 문전수거 정착에 따른 가연분의 함량이 점점 높아져 수분과 가연분의 함량이 거의 일정한 비율로 분포되어 있는 것을 알수 있다. 이는 2001년을 기점으로 수분 및 가연분이 급격한 변화를 보인 것으로 나타났으며, 이는 향후 쓰레기 조성에서 수분 함량은 지속적으로 감소되고 가연분 함량은 증가하는 추세변화를 예측할 수 있는 결과를 보여주고 있다. 한편, 회분은 연도별로 큰 변화 없이 7%대의 함량을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

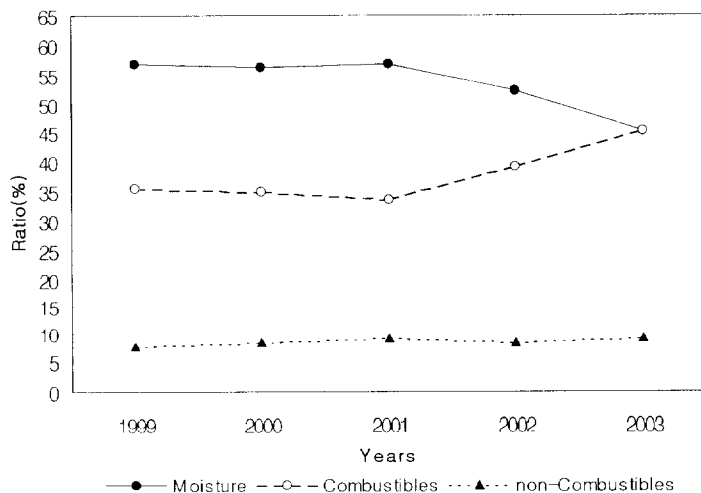


Fig. 9. Variation of chemical composition(Moisture, Ash, combustibles) on solid waste from 1999 to 2003.

지금까지의 폐기물반입 성상등의 경향을 살펴본 결과, 폐기물 발열량의 증가는 소각로 출구온도의 상승과 직결되어 소각로의 입열부하에 많은 영향을 미칠 수 있는 주요한 요소중의 하나로 판단되었다.

Fig. 10에 나타낸 바와 같이 2001년 이전까지의 출구온도는 설계기준치인 850~950℃을 크게 벗어나지 않고 있으며, 쓰레기발열량도 설계치인 1,400kcal/kg에서 적정 유지되고 있음을 알 수 있다. 그러나, 2001년 이후를 기점으로 출구온도와 발열량은 거의 동시에 급속한 변화추이를 보이는데 쓰레기의 급격한 성상변화에 따른 결과로 보인다. 이러한 변화는 소각로의 열적부하를 가중시켜 결국 대상소각시설의 소각처리량 감소로 이어지는 결과를 유도하는 것으로 나타났다.

Fig. 10에서는 소각로 출구온도와 쓰레기발열량과의 연도별 변화추이 나타내었다.

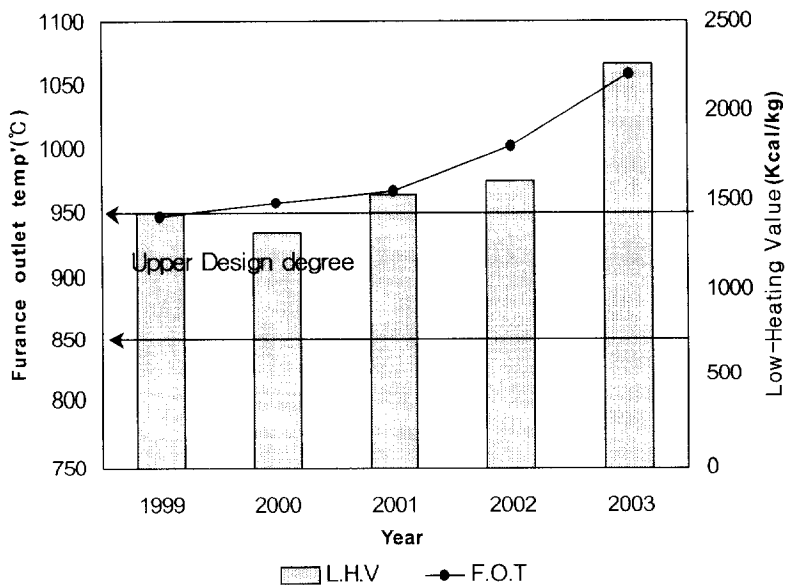


Fig. 10. Variation of low heating value and output on incinerator.

1.2 대기오염물질의 농도수준

본 연구대상시설의 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질 중 CO, NO_x, DUST, SO_x, HCl, Dioxin 을 측정하여 1999년부터 2003년까지 측정기간 별로 대기오염물질의 농도수준 및 배출경향을 살펴보았다.

Fig. 11에는 소각로내 연소의 운전지표인 CO의 배출농도를 나타내었는데 CO농도의 연간 변화추이를 살펴보면 1999년에 평균 6.4ppm 정도의 분포로 비교적 높은 농도를 보이다가 2000년 평균 3.4ppm, 2001년 평균 2.2ppm, 2002년 평균 1.4ppm, 2003년에는 평균 1.6ppm으로 분석주기마다 다소 편차는 있었으나 점차 감소하는 경향을 보였다. 특히, 2001년을 기점으로 이후 CO농도가 낮아지는데 발열량 상승시점과 일치하는 모습을 보여주고 있다. 이는 발열량 상승으로 인한 소각로내 온도상승이 소각폐기물을 완전연소 하였음을 보여주고 있다.

소각 후 발생하는 바닥재(Bottom Ash)의 강열감량 값의 변화를 보면 1999년에서 2003년까지 지속적으로 감소되는 패턴을 보였는데 CO농도가 높은 것은 폐기물의 미연분 발생으로 인해 강열감량이 상승했음을 의미하고, CO농도가 낮은 것은 폐기물의 완전연소를 통해 강열감량도 낮아졌음을 의미한다. 그러나, 완전연소로 인한 CO농도는 감소되었으나 소각로 열적부하는 증가한 것으로 판단된다.

또한, 계절에 따른 CO농도의 변화는 일정한 경향을 보이지 않아 계절적 영향은 적은 것으로 나타났으며, 2003년에 CO농도가 일부 상승한 것은 소각시설의 장기간 가동으로 인한 노후화로 최적의 운전상태를 유지하기 어려웠고, 소각시설 대보수작업(2003년 7월~9월)을 실시한 이후 운전변화의 적응과정에서 일시적으로 영향을 끼친 것으로 판단되었다.

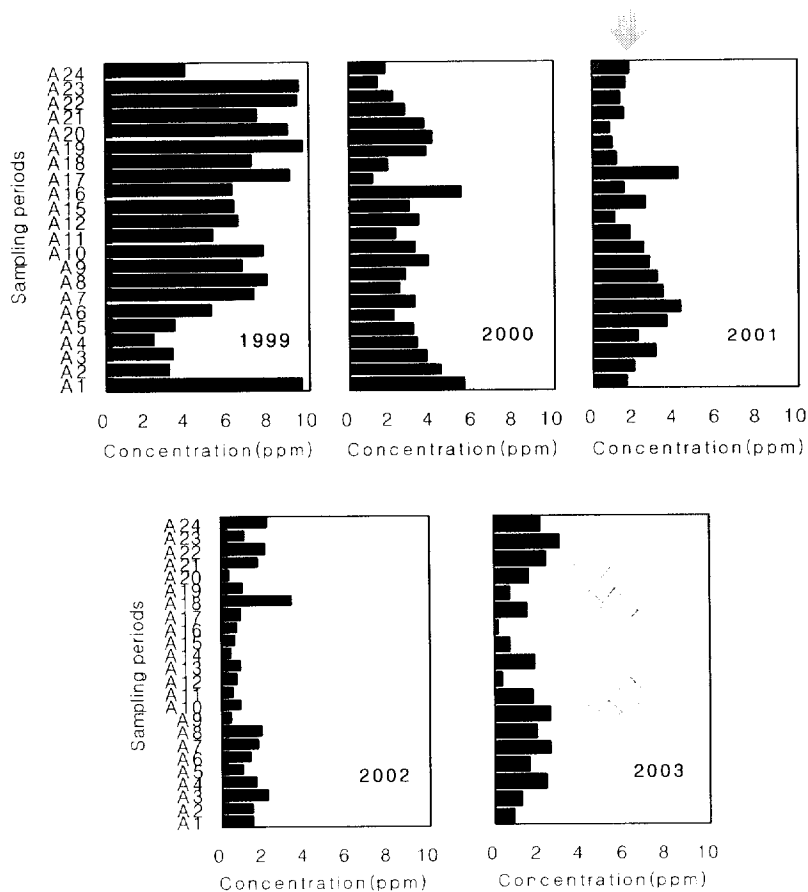


Fig. 11. Variations of CO levels from 1999 to 2003.

본 연구대상시설의 NOx 제거용 방지설비는 SCR(Selective Catalytic Reduction)설비로서, 1997년 1월부터 1998년 1월까지 약 1년간에 걸쳐 2단 촉매System으로 최초 설치되어 운전되어 왔으나 질소산화물 농도를 40ppm 이하로 적정 제어하기 위해서는 암모니아수의 투입량이 늘어나고 이에 따라 2차 환경오염을 유발할 뿐 아니라 향후 강화되는 배출허용기준에 적극적으로 대처하기 위해 1999년에 SCR 촉매를 기존 2단에서 1단을 추가하여 총 3단으로 구성, 현재까지 운영중에 있다.

Fig. 12에서 NOx의 연도별 변화추이를 살펴보면 배출농도에 변화가 많지 않았으나 2002년을 기점으로 일부 변화가 있음을 알 수 있다. 1999년초에 SCR 설비의 시운전 과정에서 농도가 일부 낮게 배출된 이후 1999년~2001년까지의 평균농도가 35~40ppm을 유지하고 있는데 이는 굴뚝자동측정기의 NOx농도를 이용하여 암모니아를 정량 투입하여 농도를 자동 조절하기 때문으로 판단된다.

NOx은 선택적촉매반응장치의 촉매에 의해 제거효율이 영향을 받는 것으로 나타났는데, 1998년 1월 1,2단의 촉매를 설치하여 가동 한 후의 NOx 농도는 평균 35ppm 정도에서 분포되어 있고 촉매 사용기간이 초과된 2001년 NOx 농도는 40ppm에 근접하고 있으며, 촉매 1단, 2단 교체한 2002년 이후의 NOx 농도는 30~33ppm을 유지하는 것으로 나타났다. 이는 암모니아의 사용량이 일부 증가된 원인이외에도 촉매교체에 따른 활성도 성능 향상으로 NOx 농도가 감소된 것으로 추정된다.

1999년 1월~2월에 농도가 낮았던 이유는 선택적촉매반응장치의 촉매를 2단에서 1단을 추가하는 과정에서 운전상의 영향으로 판단된다.

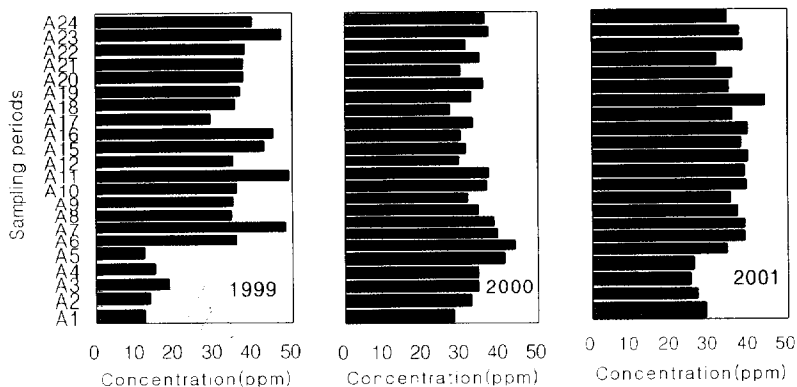


Fig. 12. Variations of NOx levels from 1999 to 2003.

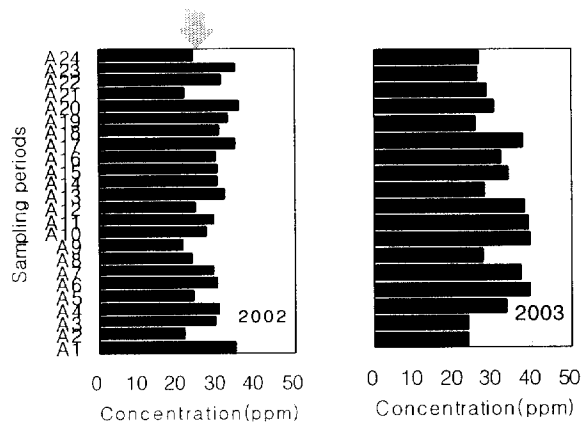


Fig. 12. Continued.

대기오염물질중 입자상 물질인 Dust는 Flue Gas 중의 Solid Particle 이 방전극과 집진극사이에 고전압을 걸어 생성된 강력한 Corona 방전 전기장을 통과시 전극판에 부착되어 포집되는 System설비인 전기집진기 (Electrostatic Precipitator)를 통해 제거되고 있다.

Fig. 13에서의 Dust 배출농도 분포 특성을 살펴보면 1999년에서 2000 년까지의 농도는 8~10mg/Sm³까지 안정된 분포를 나타내고 있다. 2001년 의 경우는 평균 7mg/Sm³ 정도까지 감소하였고 2002년까지는 평균 6mg/S m³의 범위내에서 분포하는 경향을 보였다. 또한, 2003년에는 Dust 농도 가 8mg/Sm³까지 증가되다가 10월에 집진장치를 전기집진기에서 여과집 진기(Bag Filter)로 교체 한 후에 분진농도는 급격히 감소되어 평균 3mg /Sm³으로 유지되는 것으로 나타났다.

Dust의 연간 배출경향에서 지속적으로 농도가 감소되는 경향을 보였 다가 2003년 2월(A4)부터 일시적으로 증가추세로 나타났는데 이는 전기

집진기의 설비수명이 한계에 도달해 집진성능의 효율이 저하되면서 농도가 상승한 것으로 나타났다.

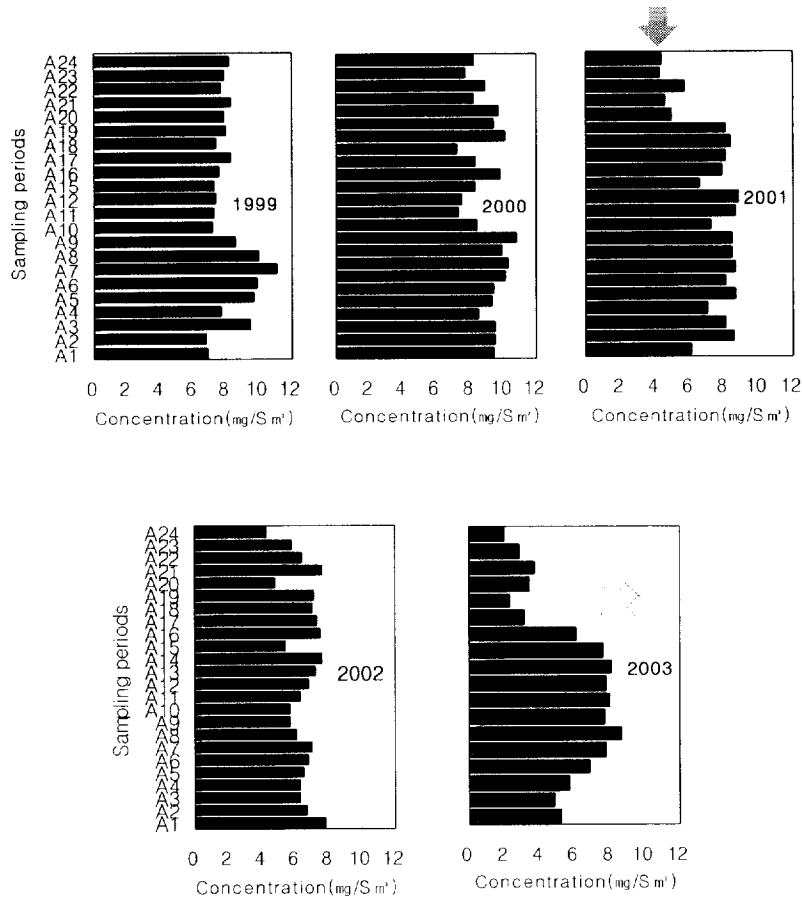


Fig. 13. Variations of Dust levels from 1999 to 2003.

산성가스인 SO_x 와 HCl 을 제거하는 설비로서 본 대상시설에서는 2기의 습식세정탑이 설치되어 있다. 1995년 최초 가동시에는 습식세정탑 1기로 운전되어 왔으나, 1998년 습식세정탑 1기를 추가로 설치하였다. 이는 배출가스 중 산성가스의 적정처리 및 SCR 설비의 촉매에 유해한 영향을 줄이기 위한 방법으로 설비 개선을 이룬 것이다.

Fig. 14~15에 나타낸 SOx와 HCl의 배출경향을 살펴보면 비교적 비슷한 패턴으로 분포되어 있는 것으로 나타났다. SOx는 1999년 6월(A12)까지는 2ppm정도의 낮은 농도를 보였는데 습식세정탑의 추가설치 후 시설운전의 안정화를 정착시키는 과정에서 가성소다(NaOH)를 늘려 투입 한 것이 원인이었다. 7월(A15)부터 농도가 높게 나타나는 현상은 운전조건의 변화를 주는 과정에서 기인한 것으로 판단된다.

2000년 1월부터 2001년 7월까지의 SOx의 평균 배출농도는 4ppm이었고 이후 2002년에 급속한 농도변화로 2ppm 이하로 떨어지는 경향을 보였는데 이때의 가성소다 약품투입량을 살펴본 결과 사용량 변동이 작은 것으로 나타나 쓰레기의 급격한 성상변화에 따른 영향으로 추정된다. 2003년에도 다른 대기오염물질의 추이와 비슷하게 농도가 4ppm까지 상승되었다가 1ppm정도로 낮게 배출되는 경향을 보이고 있다. 이 또한 소각시설의 노후화로 인한 성능저하가 배출농도를 증가시켰으며, 소각시설 대보수 이후 감소된 것으로 나타났다. Fig. 14는 SOx의 농도 변화에 따른 배출경향을 나타내었다.

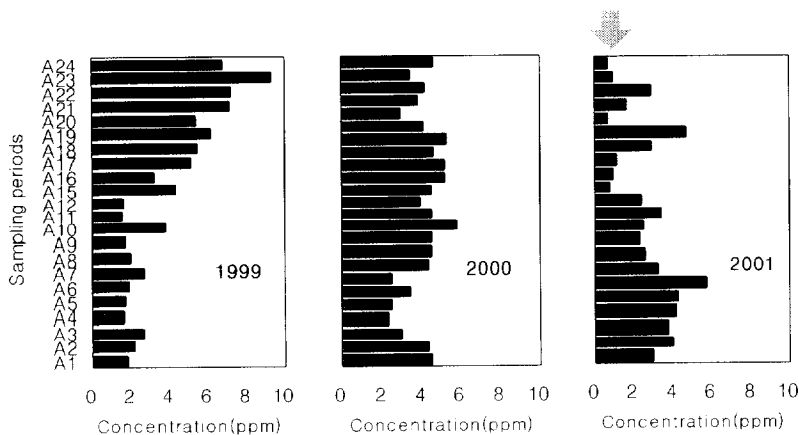


Fig. 14. Variations of SOx levels from 1999 to 2003.

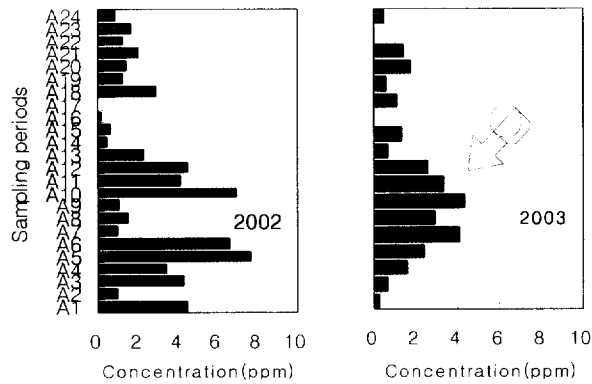


Fig. 14. Continued.

Fig. 15에 나타낸 HCl의 배출경향을 살펴보면 SOx의 배출경향과 아주 유사한 분포 특성을 나타낸다. 1999년 6월(A12)까지 0.5ppm의 낮은 농도를 보이다가 7월(A15)에는 2ppm 가까이 상승하는 것으로 나타났다. 이후 2000년까지 지속적으로 유지되다가 2001년 1ppm으로 저감되어 배출되었다. 2003년에도 HCl의 배출경향처럼 농도가 상승하였다가 감소하는 변화특성을 보였다.

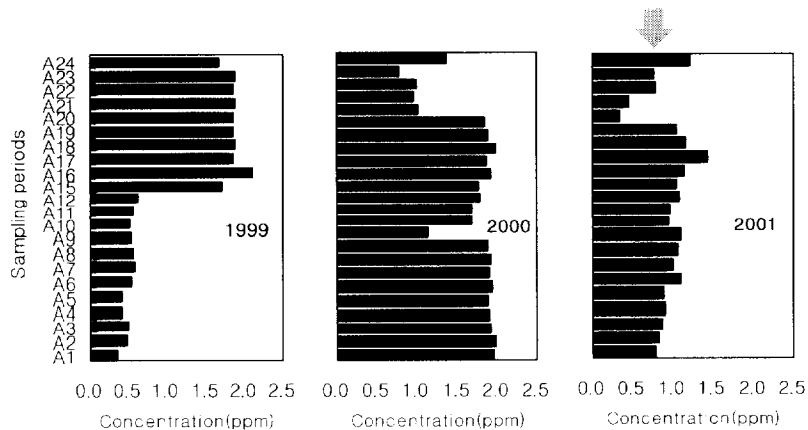


Fig. 15. Variations of HCl levels from 1999 to 2003.

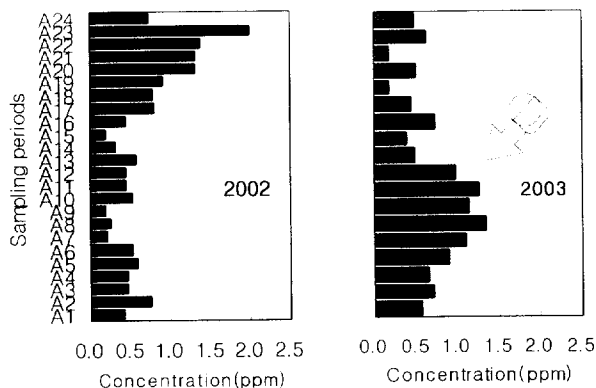


Fig. 15. Continued.

본 대상시설에서의 가장 유해한 오염물질 중의 하나인 다이옥신류 농도를 Fig. 16에 나타내었다. 1999년부터 2003년까지 PCDDs/DFs의 독성 등가환산량(TEQ)으로 환산된 농도 범위는 연도별로 차이를 보이나 유사한 패턴을 보여주고 있다.

1999년 3월, 10월의 농도범위로는 PCDDs $0.000 \sim 0.013 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$, PCDFs $0.000 \sim 0.083 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$ 으로 나타났다. 2000년 7월, 11월에는 PCDDs $0.000 \sim 0.002 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$, PCDFs $0.000 \sim 0.007 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$ 이었으며, 2001년 5월, 10월에는 PCDDs $0.000 \sim 0.006 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$, PCDFs $0.000 \sim 0.040 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$ 로 조사되었다. 또한, 2002년 3월, 12월에 PCDDs $0.000 \sim 0.004 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$, PCDFs $0.000 \sim 0.038 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$ 이었으며, 2003년 5월, 10월에 PCDDs $0.000 \sim 0.001 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$, PCDFs $0.000 \sim 0.028 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$ 의 농도범위를 보였다.

1999년에 높은 농도범위를 나타냈는데 이는 분말활성탄 투입량에 따른 영향으로 보이고 2001년에 비교적 농도가 높았던 것은 SCR 촉매의 활성도 저하에 따른 촉매성능 감소에 따른 영향으로 추정된다. 2003년에

가장 낮은 농도 분포를 보인 것은 소각시설 3단 촉매 교체 및 장기간 소각시설 운전과정에서의 운전자의 운전기술이 일정한 수준에 도달하여 적정 하게 소각시설을 가동하였기 때문으로 판단된다.

또한, 이성체별 농도수준은 PCDDs 보다 PCDFs 에서 대체적으로 높은 분포를 보였는데, 2,3,4,7,8-PeCDF가 각 이성체별로 기여율이 가장 높았으며, 1,2,3,7,8-PeCDD, 1,2,3,4,7,8-HxCDF, 1,2,3,6,7,8-HxCDFs, 1,2,3,4,6,7,8-HxCDF의 기여율도 높은 것으로 조사되었다. 또한, 대기 침적물에서의 가장 독성이 강한 2,3,7,8-TCDD는 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

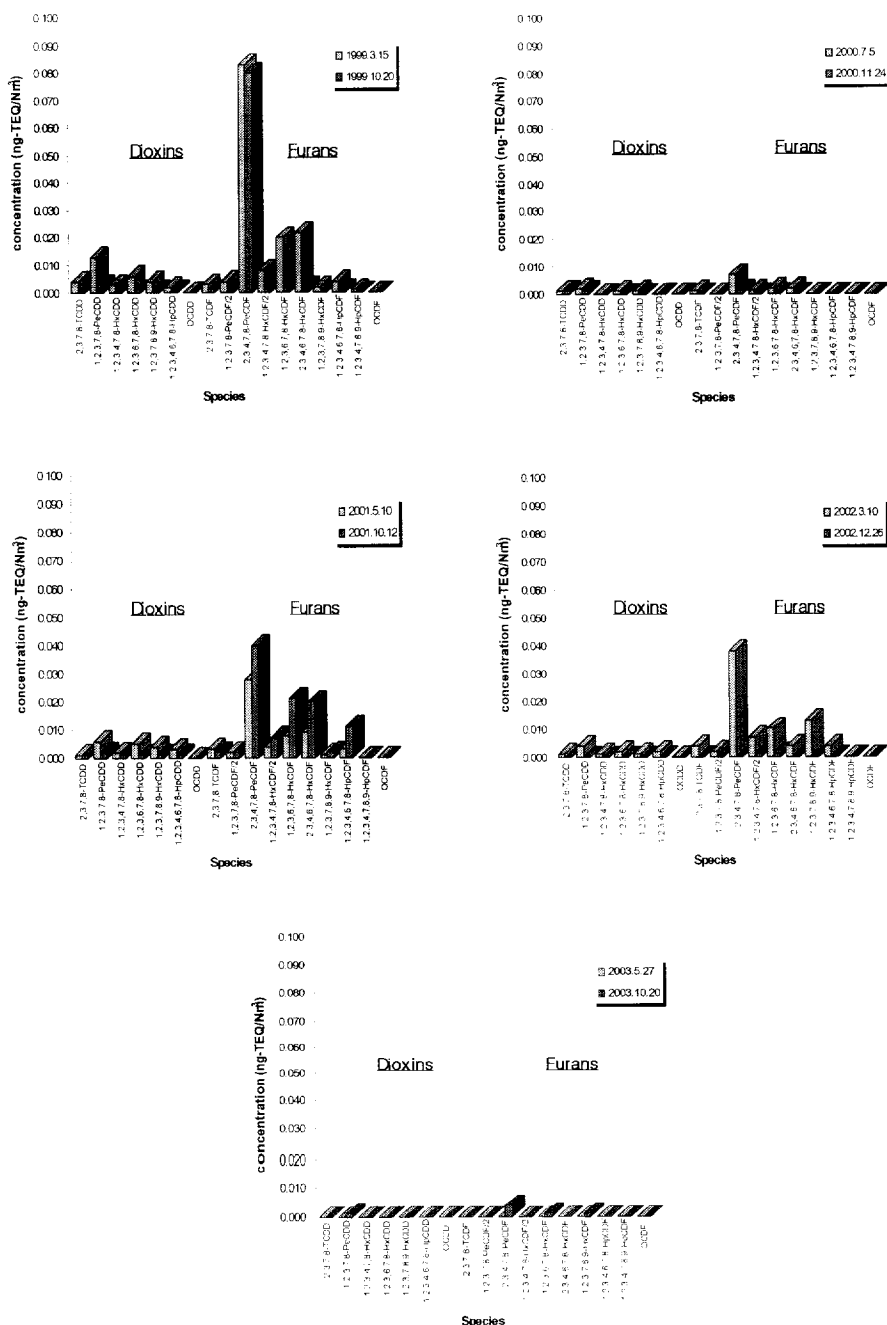


Fig. 16. Isomer profiles of Dioxin levels from 1999 to 2003.

1.3 소각시설 운전요소와의 상관성 해석

본 연구대상시설에서는 1995년 최초 가동 후 1998년까지 많은 시설개선을 하여 왔으며, 여러 가지 운전조건을 부여해 최적의 운전상태를 유지하게 되었다. 그러나, 1999년부터는 비교적 시설은 안정된 상태였지만 쓰레기 성상변화 등 외부 요인에 의해 특성이 많이 변화되는 시기였다. 더구나, 쓰레기 질이 변화되는 과정에서 소각시설의 각 운전요소도 많이 변화되어 왔는데 이런 과정속에 이들 운전요소와 폐기물 성상 및 대기오염물질간의 상관성에 대하여 검토하였다.

1999년부터 2003년까지 소각시설 각 운전요소별로 그 특성 및 오염물질과의 선형관계를 수치로 알아보기 위해 5년간에 걸쳐 측정한 자료를 대상으로 상관성 분석에 적용하였고, 상관성 분석을 위한 통계처리로 SPSS for Window Release 10.0 프로그램을 이용하였다.

총 37개 항목 중 일부 상관성을 보인 17개 항목간의 상관성분석을 위한 통계처리를 실시한 결과는 Table 8과 같다.

Table 3. Correlation matrix among 17 variables

Variables	LHV	VSL	Mixture	Combustibles	non-Combustibles	Paper	Plastics	Wood	Food	non-Food	HCl	SOx	NOx	CO	DUST	1st Air Flow
Variables	1.000															
LHV	-0.772	1.000														
VSL	0.430	-0.530	1.000													
Mixture	0.722	-0.839	0.519	1.000												
Combustibles	-0.682	0.610	-0.536	-0.682	1.000											
non-Combustibles	-0.266	0.249	-0.066	-0.260	-0.110	1.000										
Paper	-0.645	0.636	-0.217	-0.638	0.335	0.367	1.000									
Plastics	0.172	0.016	-0.238	-0.168	0.147	-0.346	-0.376	1.000								
Wood	-0.616	0.594	-0.408	-0.582	0.367	0.064	0.249	-0.066	1.000							
Food	0.688	-0.616	0.538	-0.738	-0.358	-0.222	-0.742	-0.230	-0.536	1.000						
non-Food	-0.602	0.272	-0.205	-0.219	0.159	0.549	0.160	-0.162	0.306	-0.269	1.000					
HCl	0.930	-0.268	0.116	-0.215	-0.056	-0.230	0.276	-0.226	0.154	-0.422	1.000					
SOx	0.404	-0.416	0.361	-0.305	-0.369	-0.331	0.203	-0.215	0.250	-0.332	0.510	1.000				
NOx	0.145	-0.204	0.065	-0.110	-0.060	0.136	0.225	-0.211	-0.061	0.007	0.420	0.240	1.000			
CO	0.627	-0.371	0.104	-0.360	-0.267	-0.366	0.664	-0.313	0.247	-0.255	0.274	0.423	0.212	1.000		
DUST	0.657	-0.548	0.316	-0.422	-0.451	-0.496	0.666	-0.257	0.551	-0.254	0.442	0.416	0.258	0.366	1.000	
1st Air Flow	-0.616	0.536	-0.365	-0.466	0.374	0.162	0.239	0.215	-0.119	0.061	-0.073	-0.216	-0.067	-0.169	-0.466	1.000

* LHV : Low Heating Value

* VSL : Volatile Solid Ignition Loss

소각시설의 전반적인 운전조건에 대한 변화를 살펴보면, 소각로 출구 온도는 1999년부터 2001년까지 865℃~960℃ 범위내에서 운전되다가 2002년부터는 930℃~1,080℃로 유지되어 운전되었다. 소각로 출구온도는 폐기물의 발열량과 밀접한 관계가 있음을 앞서 설명했듯이 일일 200톤의 소각용량인 대상소각시설의 폐기물 발열량과 소각처리량의 상관성 분포를 비교한 Fig. 17을 살펴보면 발열량 증가에 따라 소각처리량은 감소하는 특성을 보였다.

발열량은 1999년 1,463kcal/kg, 2000년 1,503kcal/kg, 2001년 1,483kcal/kg, 2002년 1,796kcal/kg, 2003년 2,275kcal/kg으로 2002년부터 급격히 증가하는 반면, 폐기물 소각처리량은 연도별로 일평균 208톤, 199톤, 200톤, 189톤, 175톤 순으로 2002년부터 감소한 것으로 나타났다. 본 대상소각시설의 폐기물발열량 설계치 범위인 1,400~1,500kcal/kg의 분포에서는 소각처리량은 일일 200톤 이상 유지하고 있으나 1,700kcal/kg에서부터는 지속적으로 감소되는 패턴을 보이는데 적정 소각처리량을 유지하기 위해서는 소각로 연소실내의 입열부하를 가중시키는 가장 큰 요소인 발열량 적정관리가 필요한 것으로 나타났다.

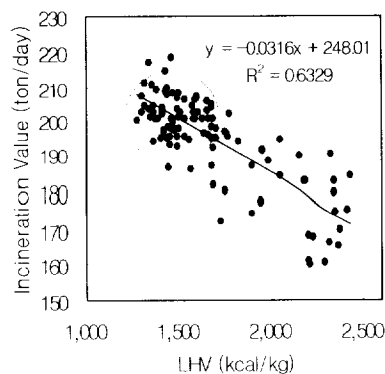


Fig. 17. The correlation with incineration value and low heating value.

이외에도 소각처리량의 변화에 따라 상관성을 보인 항목을 살펴보면 대기오염물질인 Dust($r=0.537$)와 CO($r=0.527$)가 (+)상관성을 보였고 운전 요소로는 1차 공기량 ($r=-0.505$)이 (-)상관성을 보였다. 또한, 소각로내 완전연소의 지표인 강열감량($r=0.438$)은 다소 낮지만 (+)상관성이 있는 것으로 나타났다.

대상폐기물의 발열량과 높은 상관성을 보인 요소로는 Fig. 18에서 보듯이 수분이 가장 큰 상관성을 보였고 가연분, 음식물류 순으로 나타났다. 삼성분 중 수분함량이 55%, 가연분 함량이 35% 일때, 물리적조성 중 음식물류가 47% 일때 발열량이 1,400kcal/kg을 유지하고 있었다. 이는 수분함량의 변화를 통해 발열량 관리가 될 수 있음을 의미하는데, 2003년 수분함량이 45%를 유지하고 있고 이때 발열량이 2,200kcal/kg이었으므로 소각로내에 쓰레기오수 분사시 수분함량을 감안하여 적정투입량을 산정한다면 발열량 관리가 원활하게 이루어질 것으로 판단되었다.

위의 항목 이외에도 발열량 변화에 따라 (+)의 상관성을 보인 항목으로는 종이류($r=0.635$), 나무류($r=0.584$) 등이었으며, 운전 요소로는 1차 공기량($r=0.536$)이었다. 또한, (-)의 상관성을 보인 항목은 대기오염물질인 Dust($r=0.527$)로 나타났다.

대체적으로 발열량과 소각처리량에 대한 상관성 항목들을 살펴보면 동일한 항목들이 값의 차이는 있지만 대부분 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 18에서는 폐기물 발열량에 대해 높은 상관성을 보인 폐기물 성분(수분, 가연분, 음식물류)과의 관계를 비교하였다.

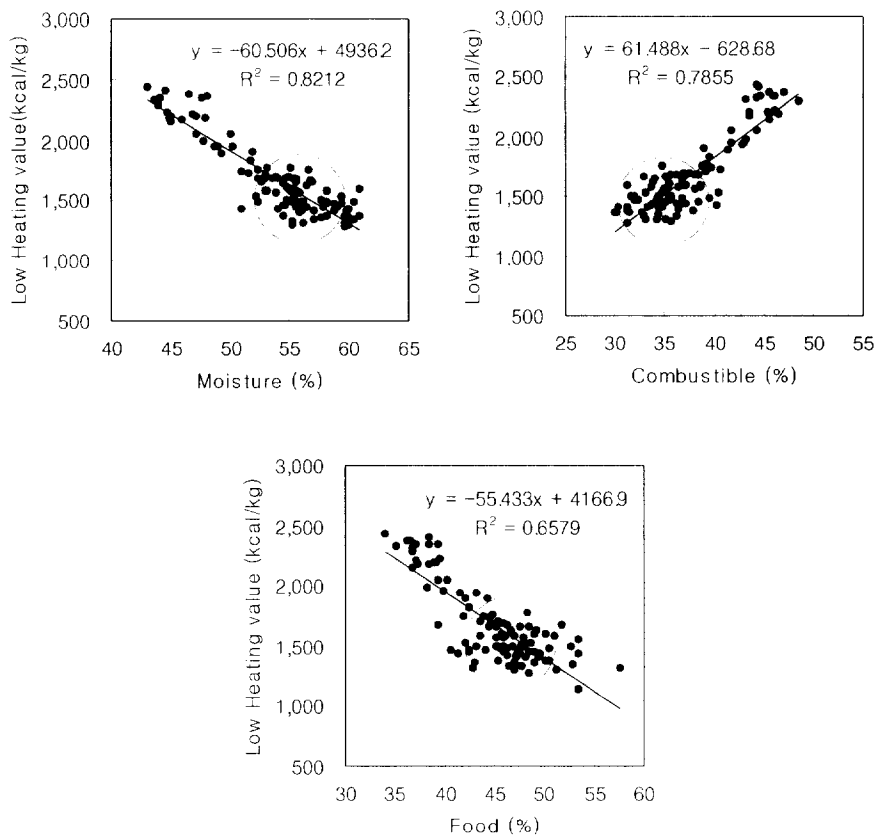


Fig. 18. The correlation with characteristics of waste and low heating value.

폐기물의 물리적 조성 중 음식물류는 폐기물 발열량에 대해 영향을 미치고 있을 뿐 아니라 여러 요소들과 상관관계에 묶여 있음을 알 수 있었다. Fig. 19에서 보던 수분 함량이 55%일 때 음식물류 함량은 47%를 보였는데 이 시점은 발열량이 설계기준치인 1,400kcal/kg을 유지하고 있는 시점으로 파악되었다. 또한, 음식물류 함량이 35%로 감소되었을 때의 수분함량은 45%였으며, 이 시점에서의 발열량은 2,200kcal/kg에서 분포하고

있음을 알 수 있다.

가연성분과의 상관성에서도 유사한 추이를 보였는데 가연성분 함량이 35%일 때 음식물류 함량이 47%에서 분포하는 경향이 높았으며 가연성분 함량이 47%일 때 음식물류 함량은 35%로 감소되는 것으로 파악되었다. 이는 수분, 가연분, 음식물류 각각의 함량 변화가 발열량의 변화와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 여러 요인과 상관성이 높은 음식물류의 반입비율을 적정산정하여 관리하면 폐기물 발열량을 감소시킬 뿐 아니라 대상소각시설의 소각처리량 또한 증가할 것으로 판단된다.

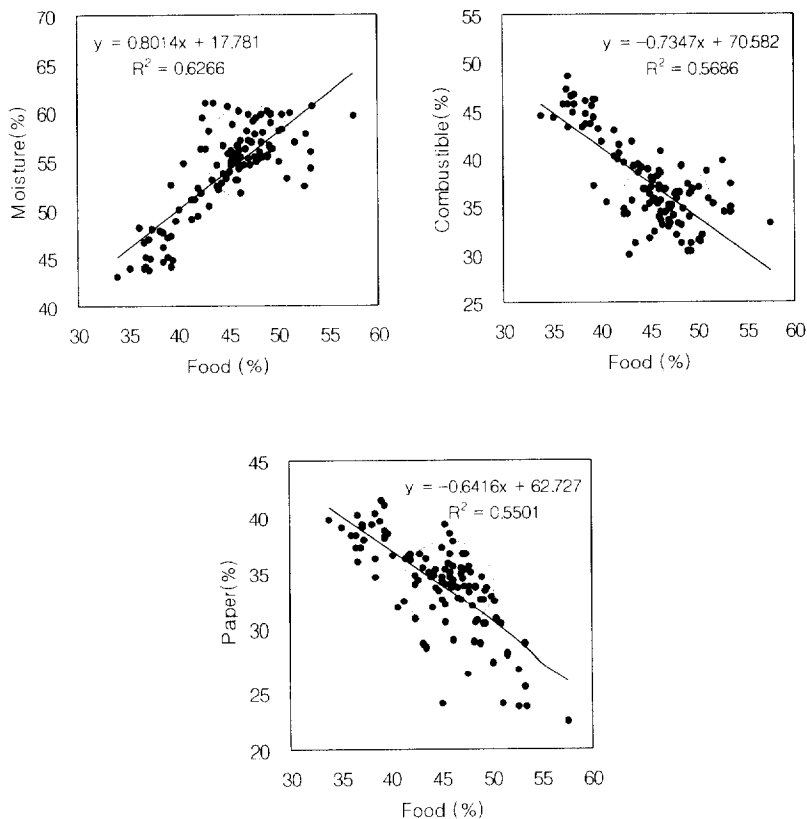


Fig. 19. The correlation with foods and low heating value.

소각대상시설의 노내 운전온도의 지표로써 1차 공기량과 절탄기 출구 산소농도(O_2)가 있는데, 1차 공기량은 소각시설 운전에서 직접·간접적으로 많은 영향을 많이 미치고 각 운전요소와도 상관성이 있는 것으로 나타났다. 단순상관행렬 계산에 의하면 소각처리량($r=-0.505$), 폐기물 발열량($r=0.536$), 가연분($r=0.574$), 음식물류($r=-0.519$)에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

실제로 1차 공기량은 1999년부터 2001년까지는 다소 변동폭은 있으나 평균 $17,000\text{Nm}^3/\text{hr} \sim 17,500\text{Nm}^3/\text{hr}$ 로 투입하였다가 2002년에는 급격한 상승으로 평균 $18,500\text{Nm}^3/\text{hr}$, 2003년에는 $20,000\text{Nm}^3/\text{hr}$ 에 근접하여 투입한 것으로 나타났다.

2차 공기량은 1999년에 $2,000\text{Nm}^3/\text{hr}$ 로 투입되었다가 점진적으로 감소되면서 2001년 $2,000\text{Nm}^3/\text{hr}$, 2002년 $2,100\text{Nm}^3/\text{hr}$ 로 일정하게 투입되다가 2002년을 기점으로 급격한 감소를 보여 $1,600\text{Nm}^3/\text{hr}$ 정도 투입한 것으로 나타났는데, 이는 전체 공기량 중 약 8%를 2차 연소용 공기로 사용한 것으로 나타났다.

산소농도는 2001년까지는 평균 6~7%에서 2002년부터 7~8%로 유지되어 운전되는 것으로 나타났다. 이는 1차 공기량을 상승시켜 연소실의 운전조건을 제어하여 CO농도를 감소시켰고 또한, 쓰레기 성상변화 등의 요인에 따라 년도별로 1,2차 공기비를 적정 계산하여 투입함으로써 소각로내 폐기물이 완전소각 되었음을 알 수 있다.

Fig. 20에서는 1차, 2차 공기량 투입량 및 ECO출구 O_2 와 CO농도와 상관 변화추이를 나타내었다.

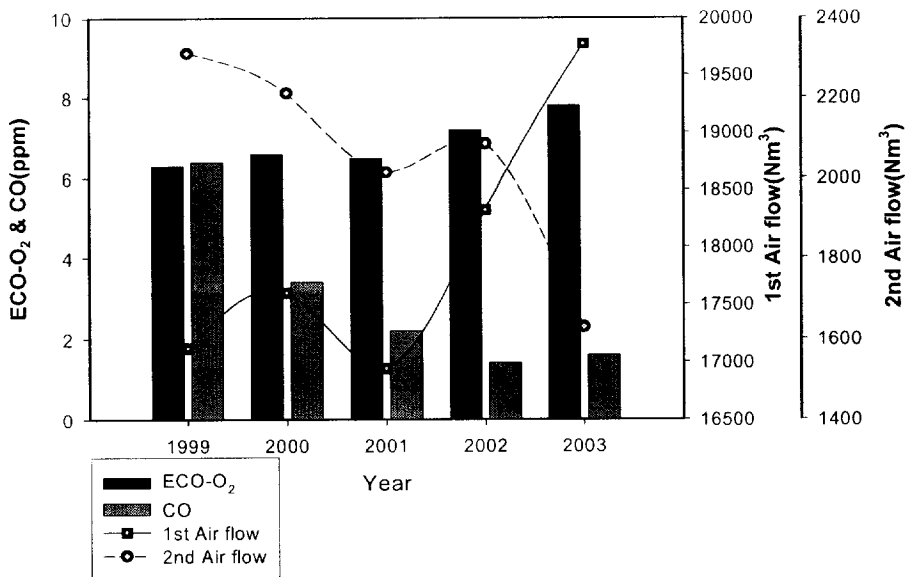


Fig. 20. Trend of 1st · 2nd air flow and output of ECO O₂ & CO concentration.

또한, 분말활성탄 분사설비는 1999년에 설치되어 전기집진기 전단에서 분말활성탄을 투입, 배기가스 중에 포함되어 있는 다이옥신 전구물질 및 유해가스를 흡착 제거토록 하고 있다.

년도별로 전기집진기의 운전온도는 다이옥신이 재합성된다는 온도범위를 벗어난 160℃~170℃에서 운전된 것으로 나타나 집진기내에서 재합성에 의한 영향이 작은 것으로 판단되어 실제 분말활성탄 투입량에 따라 Dioxin의 배출농도가 어떤 분포를 보였는지를 살펴보았다.

1999년~2003년까지 총 10회에 걸쳐 측정된 Dioxin 농도는 분말활성탄 분사설비가 설치되기 전인 1999년 3월에 0.16ng TEQ/Nm³ 이상의 매우 높은 농도를 보였다가 분말활성탄 설비 설치 이후에는 낮은 농도 분

포를 보여주고 있다. 이후 분말활성탄 투입량 증가에 따라 다이옥신 농도가 감소되는 경향을 보였는데 분말활성탄을 110mg/Nm³ 투입하였을 때의 다이옥신 농도는 0.08ng-TEQ/Nm³로 나타났고 130~140mg/Nm³ 투입 시에는 0.02ng-TEQ/Nm³ 이하의 농도를 보였다.

한편, 분말활성탄 투입량이 180mg/Nm³ 일 때 다이옥신 농도가 0.00~0.01ng-TEQ/Nm³ 까지 낮아지는 경향을 보였는데, 측정당시의 SCR설비의 운전온도는 년도별로 큰 변화는 없었지만 SCR 촉매성능의 효율성 여부는 실제 추정하기 어려웠고 또한, 일부 운전요소별 조건의 차이를 감안하라고 하더라도 분말활성탄은 설계치 투입량인 125~200mg/Nm³ 범위중 약 150mg/Nm³ 정도 투입되는 것이 다이옥신 저감효과 및 운영비용 절감에 있어 가장 적정할 것으로 판단되었다.

Fig. 21에서는 분말활성탄 투입량에 따른 다이옥신의 농도변화 추이를 나타내었다.

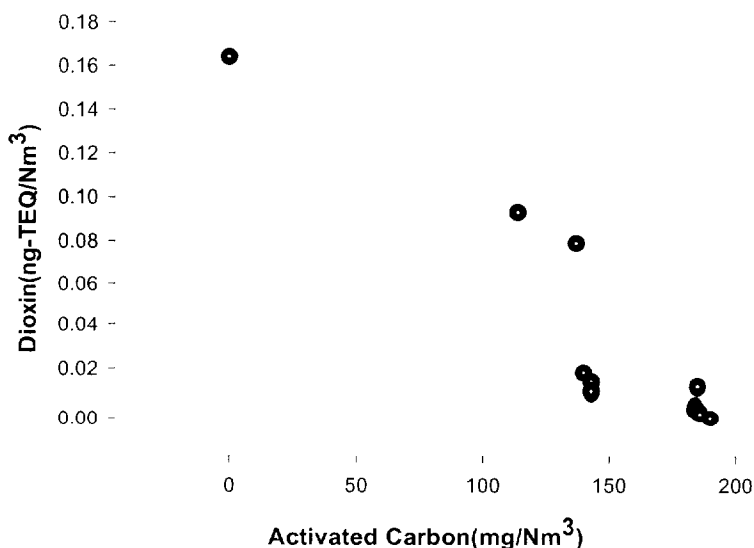


Fig. 21. Variation of Dioxin concentration according to addition of PAC.

습식세정탑은 산성가스를 중화하여 최종처리하는 설비로 1차와 2차로 나누어져 있으며 중화제로는 50% 원액 NaOH를 25%로 희석하여 습식세정탑 내부에 분무하고 있다. 습식세정탑내 산성가스를 제어하기 위해 1차 습식세정탑과 2차 습식세정탑내의 pH를 NaOH를 통해 조정하여 운전하고 있으며, Fig. 22는 각 세정탑내의 5년간 측정된 pH 농도변화에 따른 HCl, SOx의 배출농도 거동을 나타내었다.

1999년~2003년의 세정탑내의 운전온도는 평균 65~68℃로 유지된 것으로 나타났으며, 습식세정탑내의 세정폐수(Bleed Water)는 평균 4m³/hr 정도를 배출한 것으로 나타났다.

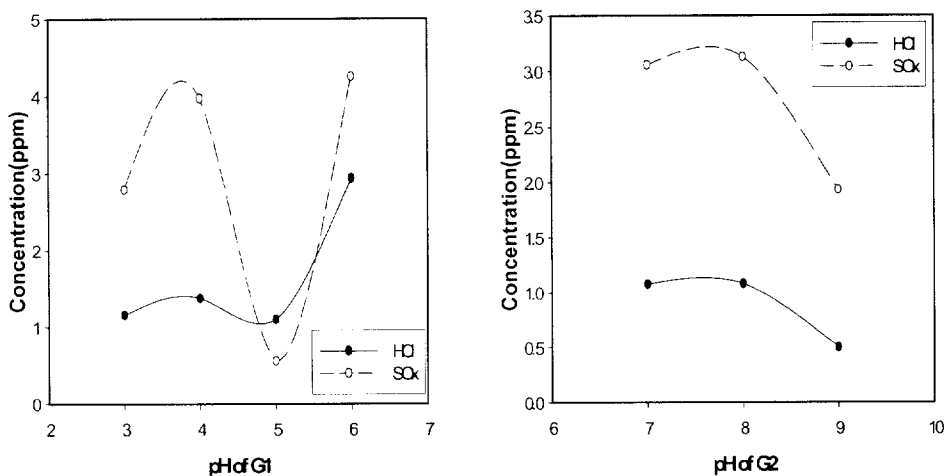


Fig. 22. Variation of HCl, SOx concentration according to changing of pH.

Fig. 22를 보면 1차 습식세정탑에서의 pH 가 3~4일 때의 HCl 농도는 비교적 일정한 분포를 보였고 SOx는 pH 가 3일 때보다는 4일 때 더 높게 나타났다. 또한, pH가 5에서 운전될 때의 HCl, SOx 농도는 모두 낮은 분포를 보였으나, pH가 5를 초과할 때부터는 두 오염물질 농도가 급속하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 1차 습식세정탑에서의 pH는

4.5~5 정도를 유지하는 것이 HCl, SOx 농도를 최대한 저감하기 위한 운전조건으로 판단되었다.

또한, 2차 습식세정탑에서는 pH가 7~8에서는 큰 변동이 없다가 pH가 상승할수록 HCl, SOx 농도가 감소되는 분포를 보였는데, 2차 습식세정탑에서의 pH는 앞서 설명했듯이 오염물질 저감보다는 SCR설비의 촉매 보호를 위한 농도 조정이므로 pH를 8정도에서의 운전이 적정할 것으로 판단되었다.

지금까지 본 연구대상시설의 각 운전요소와의 상관성 해석을 통해 대기오염물질의 배출특성 및 거동을 파악할 수 있었다. 그러나, 실제 대기로 배출되는 대기오염물질의 배출총량에 대해서는 조사가 부족한 실정으로 1999년부터 2003년까지의 본 연구대상시설에서 배출된 실측농도를 적용하여 각 오염물질별로 배출계수 및 배출량을 산정하여 그 변화추이를 살펴보고자 한다.

2. 소각시설에서의 대기오염물질 배출량 산정

2.1 배출가스의 농도 분포

굴뚝으로 배출되는 배출가스의 대기오염물질 배출량을 산정하기 위해서는 배출가스의 성분 분포 파악이 우선적으로 선행되어야 한다. 따라서, 배출가스의 온도(Temperature), 속도(Velocity), 수분(Moisture), 산소(Oxygen)를 분석하여 그 특성을 파악한 후 최종적으로 보정된 유량(Flow rate)을 월별로 정리하여 배출량 산정에 적용하였다. Table 9에서는 굴뚝으로 배출되는 배출가스의 특성을 월별로 나타내었다.

Table 9. The physical characteristics of output gas from the Stack in incineration facilities

	Temperature (°C)	Velocity (m/sec)	Moisture (%)	Oxygen (%)	Flow rate (Sm ³ /hr)
1999					
Jan.	214	4.4	12.4	10	68,244
Feb.	218	4.4	12.5	9	73,853
Mar.	196	4.6	17.6	11	62,239
Apr.	226	4.3	19.6	10	59,573
May	214	4.3	19.6	10	60,059
Jun.	204	4.2	19.5	10	60,738
Aug.	206	3.8	21.2	9	73,849
Sep.	215	3.8	18.7	9	59,293
Oct.	218	4.1	18.1	9	63,009
Nov.	225	3.8	16.7	8	65,497
Dec.	227	4.3	17.4	8	69,326
Ave.	215	4.2	17.6	9	65,062

Table 9. continued

	Temperature (°C)	Velocity (m/sec)	Moisture (%)	Oxygen (%)	Flow rate (Sm ³ /hr)
2000					
Jan.	223	4.3	16.3	8	70,647
Feb.	234	5.6	16.5	13	69,619
Mar.	213	5.3	16.8	12	69,397
Apr.	208	5.2	16.9	13	64,589
May	209	5.4	16.7	12	70,396
Jun.	206	5.2	17.8	13	63,075
Jul.	223	5.7	17.2	14	61,728
Aug.	202	6.2	19.2	13	82,699
Sep.	229	6.1	20.9	13	72,355
Oct.	232	6.5	20.6	14	67,438
Nov.	208	6.6	21.4	13	78,169
Dec.	206	6.7	21.5	14	69,255
Ave.	216	5.7	18.5	13	69,947
	Temperature (°C)	Velocity (m/sec)	Moisture (%)	Oxygen (%)	Flow rate (Sm ³ /hr)
2001					
Jan.	227	3.5	15.2	13	54,318
Feb.	227	3.3	15.8	13	58,021
Mar.	223	5.7	23.4	14	57,082
Apr.	220	4.8	21.2	13	56,221
May	217	4.5	17.2	9	70,903
Jun.	204	4.5	14.2	9	76,141
Jul.	255	4.6	15.8	8	73,769
Aug.	225	4.8	15.0	9	77,151
Sep.	227	4.5	16.0	10	65,474
Oct.	231	5.0	18.6	10	68,703
Nov.	209	4.4	16.8	8	77,598
Dec.	224	4.4	15.7	8	74,889
Ave.	224	4.5	17.1	10	67,523

Table 9. continued

	Temperature (°C)	Velocity (m/sec)	Moisture (%)	Oxygen (%)	Flow rate (Sm ³ /hr)
2002					
Jan.	222	4.4	13.8	9	70,972
Feb.	234	4.7	13.7	8	80,278
Mar.	222	4.6	13.7	8	80,475
Apr.	233	4.4	13.4	8	75,564
May	214	4.2	14.4	9	68,380
Jun.	229	4.5	15.2	8	76,278
Jul.	221	4.5	15.8	8	76,965
Aug.	211	4.5	16.3	8	78,089
Sep.	215	4.7	15.9	9	75,025
Oct.	202	4.8	14.9	9	79,655
Nov.	213	4.7	14.4	9	76,678
Dec.	211	4.7	13.6	10	71,238
Ave.	219	4.6	14.6	9	75,800
	Temperature (°C)	Velocity (m/sec)	Moisture (%)	Oxygen (%)	Flow rate (Sm ³ /hr)
2003					
Jan.	230	4.9	13.5	9	78,051
Feb.	228	4.9	14.1	9	77,819
Mar.	232	4.8	14.3	10	69,163
Apr.	225	5.1	16.2	10	72,867
May	214	4.3	16.4	11	56,977
Jun.	223	4.6	12.1	12	56,625
Oct.	217	4.2	11.5	10	64,408
Nov.	222	4.2	11.4	10	63,830
Dec.	219	4.4	10.6	11	61,713
Ave.	223	4.6	13.3	10	66,828

2.2 대기오염물질 배출량 산정

대기오염 문제를 해결하기 위해서는 대기오염물질과 발생메카니즘의 규명을 통하여 비용·효과(cost-benefit)적으로 유용한 대기오염물질 저감대책을 마련, 평가하고, 결정하여야 가능하며, 이를 위해서는 대기오염물질의 배출계수(Emission Factor)에 의한 배출량을 산출하여 배출특성을 정확히 파악하여야 한다.

따라서, 현실여건에 부합되고 검증된 배출계수의 정확한 적용을 위하여 대상소각시설에서 배출되는 대기오염물질별로 세분하여 체계적으로 구성하여 월별배출량의 분포를 산출하였다.

본 연구에서 배출량 산정방식은 소각시설에서 대기로 배출되는 대기오염물질인 CO, NO_x, DUST, SO_x, HCl, Dioxin의 실측농도를 근거로 하여 연간 배출량을 산정하였다. 배출량 산정방법으로는 굴뚝에서 직접 측정된 대기오염물질의 실측농도, 배출가스의 유량과 소각처리량, 운전시간, 가동일수 등의 자료를 확보하여 각 오염물질의 배출계수(Emission Factor, *EF*)를 산정, 각각의 활동도(Annual activity, *A*)를 곱하여 월간 배출량을 산정한 후 이를 합산하여 최종 연간 배출량을 산정하였다.

대기오염물질 월간 배출량 산정 공식은 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$R_{air} = EF \times A$$

여기서, R_{air} : 대기오염물질의 월간 배출량(kg/month)

EF : 대기오염물질의 월별 배출계수(kg/ton)

A : 월간 활동도(ton/month)

(1) 배출계수(Emission Factor, *EF*)

대기오염물질 배출계수는 1999년부터 2003년까지 측정 기간동안 배출된 오염물질 실측농도를 통해 월별로 각각 배출계수를 구하였고, 기체상 물질과 입자상물질로 구분하여 산정방법을 적용하였다.

CO의 배출계수범위는 0.004~0.087kg/ton, NOx의 배출계수범위는 0.213~0.773kg/ton, Dust의 배출계수범위는 0.021~0.090kg/ton으로 나타났다. 또한, SOx, HCl의 배출계수범위로는 각각 0.007~0.090kg/ton, 0.004~0.030kg/ton으로 조사되었다.

본 연구대상시설에서의 대기오염물질 중 가장 유해한 오염물질로 평가되는 Dioxin의 배출계수범위는 0.000~1.171 μ g-TEQ/ton으로 평균 0.329 μ g-TEQ/ton으로 조사되었다. 대기오염물질별 배출계수 값을 Table 10에 나타내었고, 배출계수 산정에 따른 연간 분포는 Fig. 23과 Fig. 24에 각각 나타내었다.

Table 10. Emission Factor of each sewerage treatment plant

(Unit : kg/ton)				
Factor Pollutants	Min	Max	Mean $\pm$ SD	Median
CO	0.004	0.087	0.030 $\pm$ 0.020	0.027
NOx	0.213	0.773	0.572 $\pm$ 0.119	0.580
Dust	0.021	0.090	0.062 $\pm$ 0.014	0.063
SOx	0.007	0.206	0.073 $\pm$ 0.043	0.063
HCl	0.004	0.030	0.014 $\pm$ 0.007	0.013
Dioxin (μ g/ton)	0.000	1.171	0.329 $\pm$ 0.432	0.112

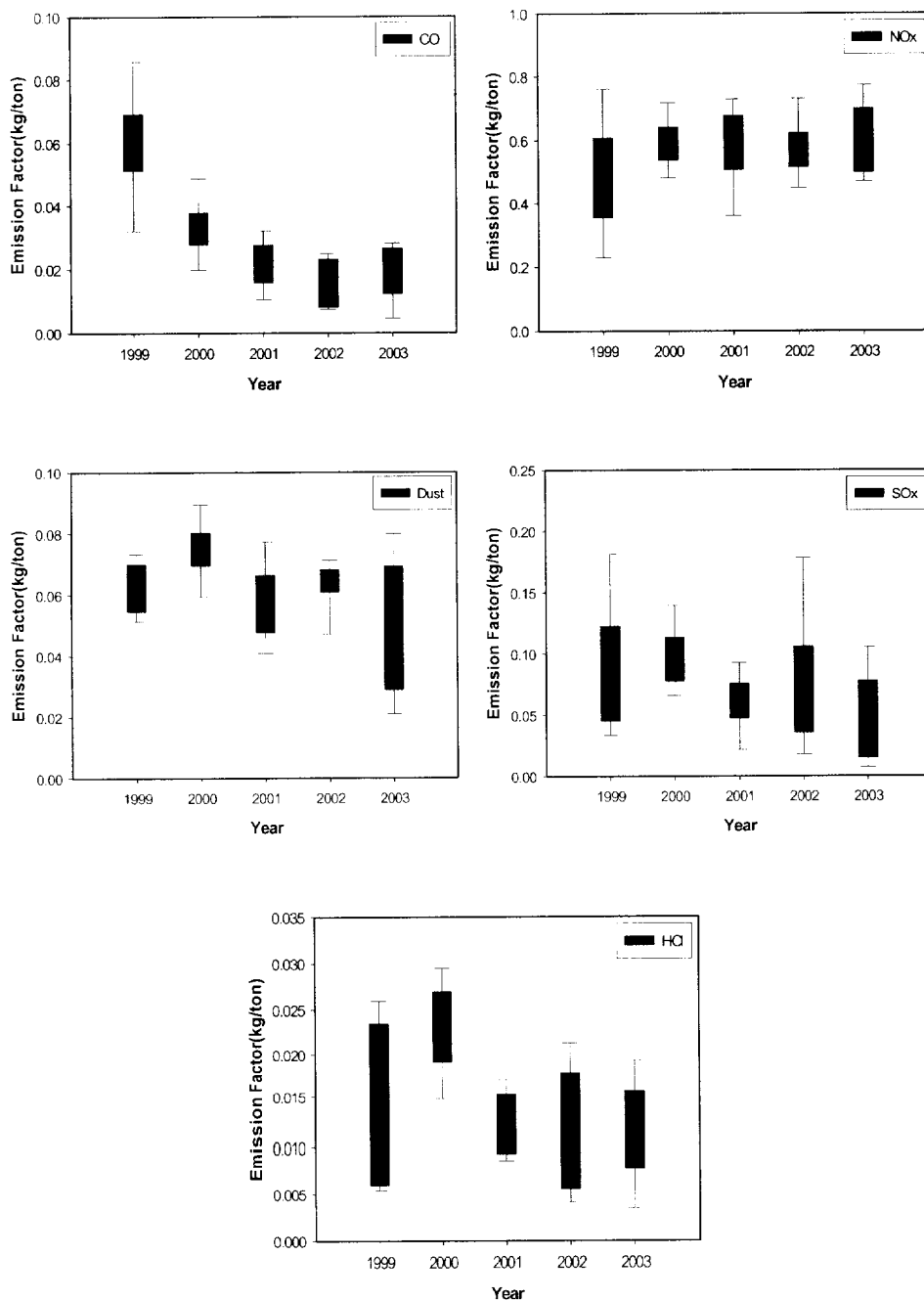


Fig. 23. Trend of yearly Emission Factor of air pollutants.

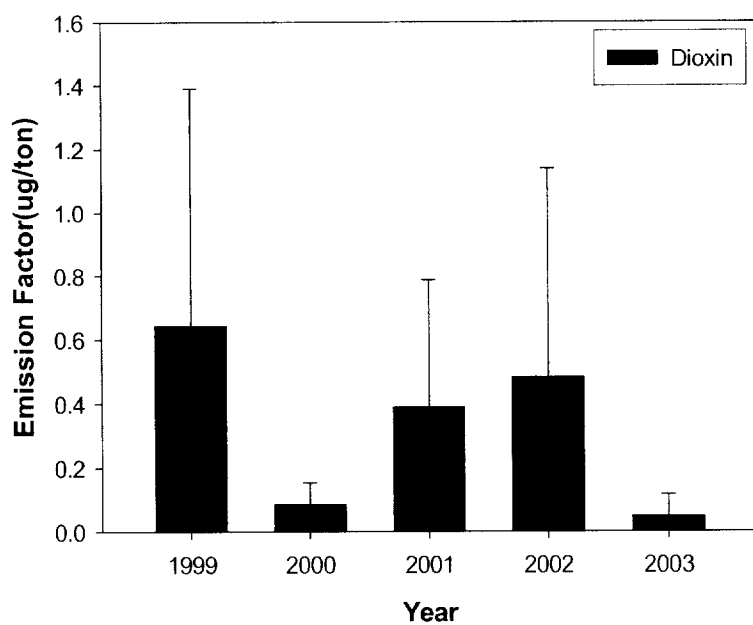


Fig. 24. Trend of yearly Emission Factor of Dioxin.

(2) 활동도(Annual Activity, A)

본 연구대상시설의 월평균 소각처리량은 1999년 5,897톤, 2000년 5,491톤, 2001년 5,585톤, 2002년 5,167톤, 2003년에는 5,160톤으로 점진적으로 감소되는 것으로 나타났다.

소각대상시설에서의 활동도 값은 대상소각시설의 월간 소각량을 적용하였으며 그 값은 Table 11에 나타내었다.

Table 11. Amount of air pollutants disposal by each pachway

	(Unit : ton/month)				
	1999	2000	2001	2002	2003
Jan.	5,289	5,016	6,033	6,144	5,797
Feb.	5,206	4,574	5,131	5,406	5,204
Mar.	5,350	6,021	5,076	4,541	4,515
Apr.	6,241	5,928	5,985	5,422	5,571
May	6,533	5,890	5,291	6,000	5,491
Jun.	5,704	4,982	5,941	4,723	4,107
Jul.	-	5,515	5,682	4,724	-
Aug.	5,884	6,064	-	5,750	-
Sep.	6,457	5,578	5,167	5,582	-
Oct.	6,207	4,244	6,373	4,438	5,443
Nov.	5,805	5,820	5,963	5,571	5,257
Dcc.	6,288	6,260	4,795	3,708	5,056
Ave.	5,897	5,491	5,585	5,167	5,160

(3) 배출량(Emission Amount, R_{air})

1999년부터 2003년까지의 연간 배출량은 일반대기오염물질의 경우, 월평균 배출계수에 월간 소각량을 곱하여 산정된 배출량을 최종 합산한 값을 적용하였고, 다이옥신의 배출량 산정은 년평균 배출계수에 연간 소각량을 곱한 값을 적용하였다.

본 대상시설의 굴뚝에서의 일반대기오염물질의 5년간 배출량 범위는 CO 894~4,067kg/yr, DUST 2,475~4,787kg/yr, NOx 28,341~37,473/yr, SOx 2,084~6,224kg/yr, HCl 541~1,414kg/yr 로 나타났다. 환경 중으로 대기오염물질이 가장 많이 배출된 해는 2000년이었고 가장 적게 배출된 해는 2003년으로 나타났다. 이는 소각 후 배기가스를 통해 대기로 실제 배출되어 환경에 영향을 미치는 총량개념에서의 배출량을 가정한 것이므로 년도별로 소각가동일수의 차이는 배제하였다.

또한, Dioxin의 5년간 배출량 범위는 3mg/yr~42mg/yr 이었으며, 일반 대기오염물질과는 다른 변화 추이를 보였다. 2000년과 2003년에 Dioxin 배출량이 낮게 나타났으며, 이에 비교하여 2001년과 2002년에 다소 높게 나타났다. 이는 Dioxin 측정기간이 년 2회로 한정되어 있어 일반대기오염물질과의 연관성과는 크지 않는 것으로 나타났다.

대기오염물질별 배출량 산정 결과는 Table 12에 나타내었고 배출량 변화추이는 Fig. 25에 나타내었다.

Table 12. The results of emission loads for air pollutants &
Dioxin loads from 1999 to 2003

(Unit : kg/yr)

Item	1999	2000	2001	2002	2003
CO	4,067	2,004	1,290	961	894
DUST	3,984	4,787	3,534	3,893	2,475
NOx	33,797	37,473	36,037	35,286	28,341
SOx	5,588	6,224	3,596	4,275	2,084
HCl	917	1,414	0,756	634	541
Dioxin (mg/yr)	42	5	25	30	3

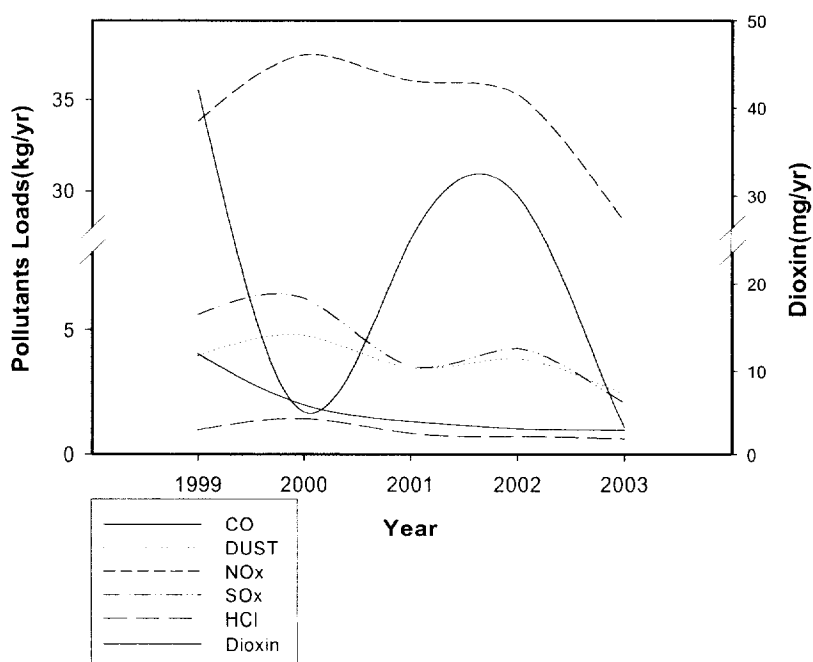


Fig. 25. Variation of air pollutants loads.

V. 결론

본 연구는 1999년부터 2003년까지 200톤/일 규모의 도시생활폐기물 소각시설을 대상으로 폐기물을 분석하여 폐기물 소각에 의해 배출되는 대기오염물질의 농도수준과 배출특성을 파악하고 소각시설 운전요소와의 상관성을 비교, 최종 배출량 산정을 통해 대기오염물질의 배출 억제를 위한 소각시설의 적정 운영방안을 확보하기 위해 수행하였다. 이에 대한 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구결과 대상소각시설에서의 폐기물 발열량의 다년간 변화는 1999년에서 2003년까지 각각 평균 1,463, 1,503, 1,483, 1,796, 2,275kcal/kg으로 나타났으며, 2002년부터 발열량은 급격한 상승을 보인 반면, 폐기물 소각처리량은 연도별로 일평균 208, 199, 200, 189, 175 톤으로 감소되는 추세로 나타났다. 이는 설계기준 발열량 1,400kcal/kg을 훨씬 초과한 것으로 발열량 상승이 소각로내의 열적부하를 가중시키는 원인으로 나타났다. 또한, 계절적인 영향도 다소 보여 봄, 가을철보다 여름철 기간이 발열량이 낮아지는 경향을 보였으며, 함수율과의 상관성이 큰 것으로 확인되었다.

2. 대기오염물질의 5년간 농도수준으로 CO는 0.5~9.7ppm, NOx는 13~43ppm, Dust는 4~11mg/Sm³, SOx는 0.1~7.8ppm, HCl는 0.2~2.0ppm, Dioxin은 0.000~0.083ng TEQ/Nm³의 범위로 나타났으며 이 중 연도별 평균 농도변화로는 CO, SOx, HCl, Dioxin이 많은 변화를 보였고 NOx, DUST는 비교적 적은 변화를 보였다. 특히, 2001년을 기점으로 두드러진 농도 감소를 보였는데 폐기물 발열량 상승시점과 일치하는 부

분이며, 노내온도의 상승이 열적부하를 증가시킨 반면, 대기오염물질 저감에 일부 기여한 것으로 나타났다.

3. 오염물질의 배출농도와 소각시설의 운전요소와의 상관성을 해석한 결과, 공통적으로 주요한 상관성을 보인 요소로는 수분, 가연분, 음식물류, 종이류, Dust, CO 및 1차 공기량 등으로 나타났다. 이중에 음식물류는 여러 분야에서 상관성을 보였는데 음식물류를 적정관리 한다면 소각로내 발열량 감소와 더불어 소각처리량을 증가시킬 수 있음을 추정할 수 있었으며, 1차 공기량은 적정공기비를 조정하여 투입함으로써 연소실의 CO 농도를 저감할 수 있었다.

4. 분말활성탄 투입량과 또한, 유해물질 배출저감의 측면에서 검토된 Dioxin 배출억제 효과는 분말활성탄을 실제 약 150mg/Nm³ 정도 투입하는 것이 Dioxin 저감효과 및 운영비용 절감에 효율적임을 알 수 있었다. 또한, 1차 습식세정탑에서의 pH는 4.5~5정도를 유지하고 2차 습식세정탑에서의 pH는 8정도 유지하는 것이 HCl, SOx 농도를 최대한 저감하기 위한 운전조건으로 확인되었다.

5. 대상소각시설에서 배출되는 배기가스내의 오염물질 배출량을 산정한 결과, 대기오염물질별 평균 배출계수는 CO 0.030kg/ton, NOx 0.572kg/ton, Dust 0.062kg/ton, SOx 0.073kg/ton, HCl 0.014kg/ton, Dioxin 0.329 $\mu\text{g-TEQ/ton}$ 으로 각각 나타났으며, 대기오염물질의 연간배출량 범위는 CO 894~4,067kg/yr, DUST 2,475~4,787kg/yr, NOx 28,341~37,473kg/yr, SOx 2,084~6,224kg/yr, HCl 541~1,414kg/yr, Dioxin 3~42mg/yr으로 나타났다. 대기오염물질을 총량개념으로 관리한다면 최종 환경 중

으로의 배출을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같은 연구결과로부터 향후 오염물질 농도변화에 따라 소각시설 운전요소의 신속한 대응을 위해 운전기초자료의 축적을 위한 연구의 필요성이 더욱더 제기되었으며, 대기오염물질을 총량개념으로 적정 관리하기 위해서는 대기오염물질 배출량 산정 시 적용되는 배출계수와 활동도 등의 정확한 자료의 확보를 위한 연구의 필요성도 요구되었다.

참고문헌

- 김윤신, (1994), 실내환경화학, 민음사, pp. 57.
- 김주은, (1995), “구동화격자 소각로의 설계/ 제작/ 운영에 관한 연구”,
인하대학교 대학원 석사논문, pp. 32.
- 유만식, (2001), “도시생활폐기물 소각시설의 다이옥신 배출특성과 저감
방안”, 인하대학교 대학원 박사논문, pp. 43-54.
- 이봉훈, (1993), 폐기물 소각로 계획 및 설계, 세화.
- 임계구, (1995), “폐기물 소각시설분석과 소각로 선정”, 한국대기보전학회
지, Vol. 11, No. 2, pp. 107-117.
- 환경부, (2002), 제2차 폐기물관리종합계획.
- 환경부, (2003), '02 생활폐기물소각시설 운영현황.
- 환경부, (2003), 전국폐기물 발생 및 처리현황.
- 환경부, (2003), 전국 생활폐기물소각시설 운영협의회.
- Chu, H., Chien, T. W., and Li, S. Y., (2001) “Simultaneous absorption
of SO₂ and NO from flue gas with KMnO₄/NaOH solutions,”
The Science of the Total Environment, Vol. 275, pp. 127-135.
- Coil, R.F., Economidis N., and Smirnitits, P. G., (1998), “Catalytic
performance of Al₂O₃/SiO₂/TiO₂ loaded with V₂O₅ for the
selective catalytic reduction of NO_x with ammonia,” *Catalysis
Today*, Vol. 40, 27-37.
- Czuczwa J. M. and Hites R. A.(1984). “Environmental Fate of
Combustion-Generated Polychlorinated Dioxins and Furans”,
Environ. Sci. Technol., Vol. 18, pp. 444-450.
- Czuczwa, J. M. and Hites, R. A. (1986). “Airborne dioxins and
dibenzofurans : sources and fates”, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.
20, No. 2. pp. 195-200.

- Eitzer B. D., Hites R. A., and Int. J., Environ.(1986). *Anal. Chem.*, pp. 27, 215.
- E. Robinson(1970), "Global effect of environmental pollutants", D. Reidel Pub. Co.
- Elkin, H. B., (1958), "The Chemistry of Industrial Toxicology", 2nd ed., *New York, London*, John Wiley and Sons, pp. 67, 81-83, 176-178.
- Flury, F., F. Zernik and Schädliche Gase(1931), *Springer, Berlin*, pp. 141.
- Hutzinger. O., M.J. Blumich, M.V.D. Berg and K. Olie, (1985), "Source and fate of PCDDs and PCDFs": An overview. *Chemosphere*, 14, pp. 581-611.
- Harrad, S. and K.C. Jones, 1992, "A source inventory and budget for chlorinated dioxins and furans in the United Kingdom environment". *Environ. Sci. Technol.*, 126, 89-107.
- Hannai, Y., Kotou,T.,H(1986). "Chlorination Process in the Refuse Incinerator's Equipments", Reprinted from Bulletin of the Institute of Environmental Science and Technology, Yokohama National University, Vol.13, No.1, pp. 37-49.
- Hannai,Y., Kanda,H., Takasuka,G., and Kotou,T.(1988), "Control of Chlorinated Compounds from MSW Incineration Plant", Reprinted from Bulletin of the Institute of Environmental Science and Technology, Yokohama National University, Vol.15, No.1, pp. 17-27.
- Kehoe, R. A. et. al., (1932), *J. Ind. Hyg*, Vol. 14, pp. 159.
- Kaiser, E. and Carotti, A. (1972), "Municipal Incineration of Refuse with 2 Percent and 4 Percent Additions of Four Plastics : Polyethylene, Polyurethane, Polystyrene and Polyvinyl Chloride", Proc. of the 1972 National Incinerator Conf., ASME, New York.

pp. 230.

Mocarelli, P., P. Brambilla, P. M. Gerthoux, D. G. Jr. Patterson, and L. L. Needham, (1996), "Change in sex ratio with exposure to dioxin". *Lancet*, pp. 348-409.

Nielsen P. G., Lokke H.(1987), "Ecotoxical. Environ. Saf.", Vol. 14, pp. 147.

OECD, (1993), Environmental Data Compendium 1993.

Olie, K., P.L. Vermeulen and O. Hutzinger, (1977), "Chlorodibenzo-*p*-dioxins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in the Netherland". *Chemosphere*, Vol. 8, pp. 455-459.

OK G., Hannai,Y., Kotou,T.(1992), "Automatic Analysis of Chlorobenzenes in the Exhaust Gas from MSW Incineration Plant", Reprinted from Bullenin of the Institute of Environmental Science and Technology, Yokohama National University, Vol. 15, No. 1, pp. 17-27.

Ok G., Kim Y.K Kim S.J., Ji S.H., Moon H.B., Kim Y.S., Lee D.I. and Han Y.H(2000), "The Evidence of Deposition for Pplycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polychlorinated Dibenzo-*p*-dioxins and Polychlorinated Dibenzofurans from Atmosphere", *Organohalogen Compounds*, Vol, 45, pp. 328-331.

Ok G., Moon H.B. Ji S.H. and Han Y.H., (1999), "Concentrations Levels and Behavior Characteritics of PCDDs/DFs in Atmosphere Organohalogen Compounds", Vol. 43, pp. 209 212.

Ryan J.Jet al.(1986), "Variation of Dioxins and Furans in Human Tissues" *Chemosphere*, Vol. 15, pp. 1585 1589.

Safe, S., (1990), "Polychlorinated biphenyls (PCBs), dibenzo *p* dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs) and related compounds:

- Environmental and mechanistic considerations which support the development of toxic equivalency factors (TEFs)". *CRC Crit. Rev. Toxicol.*, Vol. 21, pp. 51-88.
- Uchida, S., Kamo, H., Kubota, H., and Kanaya, K., (1983), "Reaction Kinetics of Formation of HCl in Municipal Refuse Incinerators", *Industrial Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 22, No. 1. pp. 144.
- US EPA, (1985), Health assesment document for polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin. EPA600/8-84/014F.
- U.S. Public Health Service, (1949), "Air Pollution in Donora", *Pa., Public Health Bull.*, Vol. 306.
- WHO, Air Pollution, (1961), Columbia University Press, New York.
- Wey, M.Y, Ou, W.Y., Liu, Z.S., Tseng, H.H., Yang, W.Y., and Chiang, B.C., (2001), "Pollutants in Incineration Flue Gas", *J. Hazard. Mater.* Vol. 82, pp. 247-262.
- Wilken et al.(1992), "Distribution of PCDD/PCDF and other organ chlorine compounds in different municipal solid waste fraction", *Chemosphere*, Vol. 25, pp. 1517-1523.
- Werther, J., T. Ogada, and C. Philippek, (1995), "Sewage sludge combustion in the fluidized bed Comparison of Stationary and Circulating Fluidized Bed Techniques", Proc 13th Int. Conf. on FBC, ASME, Florida, Vol. 2, pp. 951-962.
- Wolff G.T, Korsog P.E, Kelly N.A and Ferman M.A, (1985), "Relationship between Fine Particulate Species, Gaseous Pollutants and Meteorological Parameters in Detroit", *Atmospheric Environment*, Vol. 19, No. 8.
- Webster, T. and P. Connet, (1998), "Dioxin emission inventories and tends : The importance of large point source". *Chemosphere*, Vol. 37, pp. 2105-2118.

Webster, T. and P. Connett, (1990), "The use of bioconcentration factors in estimating the 2,3,7,8-TCDD content of cows milk". *Chemosphere*, Vol. 20, pp. 779-786.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 깊은 관심과 함께 지도편달을 아끼지 않으셨던 옥곤 교수님의 은혜에 진심으로 감사드리며, 더불어 본 논문 심사에 많은 애정을 가져 주시고 조언을 아끼지 않으신 김영섭 교수님, 정용현 교수님에게도 심심한 감사의 말씀을 드립니다. 수학기간 동안 학문의 진리를 일깨워주신 한영호 교수님, 이동인 교수님에게도 이 지면을 빌어 고마움을 표하고자 합니다. 또한, 본 논문이 있기까지 편집에 많은 도움을 주신 송미경님께 진심으로 감사를 드립니다.

지금껏 학문을 수행할 수 있도록 곁에서 묵묵히 지켜봐 주신 김옥희 소장님, 김영철 소장님, 최상인 팀장님, 안병철 팀장님에게 감사드리며 특히, 소각기술의 기틀을 잡아주신 김영수 팀장님에게도 깊은 고마움을 전하고 싶습니다. 소각로의 최적운전을 위해 함께 고생한 이성재, 권순현, 이용수 대리님, 김영하, 최승열, 배종국, 최강석, 손석규, 남재주 계장님과 지금도 현장에서 땀 흘리며 고생하고 계실 여러 직원분에게도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 늦은 시간까지 학문에 정진하시는 다이옥신연구센터의 김동환님, 지성희님, 김영교님, 김성용님, 박지현님, 김철수님, 정봉길님, 황인자님, 이지경님, 김동욱님, 황성민님, 정보라님에게도 그동안의 관심에 깊은 감사를 드립니다.

그리고 제가 가장 존경하는 아버님과 사랑스런 어머니님, 인자하신 장인, 장모님, 늘 노력하는 모습이 자랑스러운 형님과 친 누님 같으시며 우리 집안을 잘 이끌어주시는 형수님, 똑똑하면서도 순수한 마음을 가진 동생과 이제 곧 엄마가 되실 제수씨에게 감사드립니다.

마지막으로 세상에서 가장 아름다운 모습으로 저를 지켜주고 격려해 준 사랑하는 아내 서은미에게 이 논문에 바친 땀을 전해드리며, 비록 어린 애기들이지만 나의 전부인 사랑스런 딸 주희와 아들 우준이에게 이 논문에 아빠의 마음을 가득 담아 보내드립니다.